PIANO TECNICO DELLE OPERE

REALIZZAZIONE DELL' ELETTRODOTTO AT 132 kV IN CAVO INTERRATO

- ***SE-TERNA-LACCHIARELLA - C.P. INFRASTRUCTURE ITALIA LAND 2 S.R.L DI SIZIANO (PV)***
- ***C.P. INFRASTRUCTURE ITALIA LAND 2 S.R.L DI SIZIANO (PV) - C.P. INFRASTRUCTURE ITALIA LAND 1 S.R.L DI SIZIANO (PV)***
- ***REALIZZAZIONE C.P. INFRASTRUCTURE ITALIA LAND 2 S.R.L DI SIZIANO (PV)***

VALUTAZIONE DEI CAMPI ELETTRICO E MAGNETICO E CALCOLO DELLE FASCE DI RISPETTO

Storia delle revisioni

Rev.03	del 20/06/2026	Richiesta di documentazione integrativa ”Procedura di Valutazione d’Impatto Ambientale ai sensi dell’art. 23 del D.lgs. 152/2006 e ss.mm.ii. relative al progetto “Data Center Stack Campus Siziano (PV).”
Rev.02	del 28/02/2026	risoluzione interferenza metanodotto SNAM nel comune di siziano
Rev.01	del 23/10/2025	Variante per aggiornamenti tecnici
Rev.00	del 20/02/2025	Prima emissione

Elaborato	CODIFICA	Verificato	**Approvato**
A. Raimondo – D. Morelli N. Tedesco – L. Civale F. Buglione Team STF	SIL8-PT-AT-DPA-05_03	G. Fiorenza Team STF	N. Calabrese (DT) C. Fiorenza (AMM) Team STF

Nicola,Fernando,Giuseppe Calabre

Firmato digitalmente da: NICOLA,FERNANDO,GIUSEPPE CALABRESE
Data: 22/06/2026 18:32:48

SOMMARIO

1 INTRODUZIONE 4

2 PREMESSA 5

3 NORMATIVA DI RIFERIMENTO 6

3.1 Richiamo delle Leggi di riferimento 8

3.2 Richiamo delle Norme tecniche di riferimento 9

3.2.1 Norme CEI 9

3.2.2 Norme tecniche diverse 10

4 CARATTERISTICHE DELL' ELETTRODOTTO IN CAVO OGGETTO DI VALUTAZIONE DEL CAMPO ELETTRICO E MAGNETICO 10

4.1 Caratteristiche principali elettriche dell' elettrodotto oggetto di nuova costruzione 10

4.1.1 Caratteristiche principali dell'elettrodotto in cavo a 132 kV 10

4.2 Caratteristiche geometriche dell'elettrodotto in cavo 11

4.3 Disposizione delle fasi 15

4.4 Valori di corrente caratteristici degli elettrodotti interessati e/o interferenti 15

5 VALUTAZIONE CAMPO ELETTRICO 16

5.1 Valutazione campo elettrico per l'elettrodotto in cavo interessato dall'opera 16

5.2 VALUTAZIONE DEL CAMPO ELETTRICO DELLE CABINE PRIMARIE 16

5.2.1 Cabina Primaria MIL08 17

5.2.2 Cabina Primaria MIL01 20

6 VALUTAZIONE DELLE FASCE DI RISPETTO E DELL'INDUZIONE MAGNETICA 22

6.1 Definizioni 22

6.2 Metodologia di valutazione 23

6.3 Calcolo delle fasce di rispetto 23

6.3.1 Calcolo delle fasce di rispetto per la linea in cavo 24

6.3.2 Calcolo delle fasce di rispetto per la Cabina Primaria 34

6.3.3 Verifica numerica delle fasce di rispetto per la C.P. in oggetto 36

7 INDIVIDUAZIONE ED ANALISI DELLE STRUTTURE INTERESSATE 41

7.1 Dati utilizzati per l'individuazione e l'analisi 41

7.2 Individuazione delle strutture potenzialmente interessate 41

8 CONCLUSIONI 42

DICHIARAZIONE 43

APPENDICE A – SCHERMATURE- 44

1 SCHERMATURE – CANALETTE O LOOP PASSIVI- 44

1.1 Premessa 44

1.2 Caratteristiche tecniche 44

1.3 Canalette 44

1.4 Capacità schermante delle canalette 47

1.5 Loop Passivi 48

APPENDICE B – VALIDAZIONE DEI SOFTWARE IMPIEGATI- 50

1 INTRODUZIONE

Con D.D. n. 3807/2026 del 23/04/2026 prot. 78794/2026 ai sensi del *D.M. 20/10/2022* del *D.P.R. 327/01* e della *D.G.R. XII/619 del 10/7/2023 in attuazione del D.M. 20/10/2022* è stato emanato il:

> *PROVVEDIMENTO CONCLUSIVO DELLA CONFERENZA DI SERVIZI PER L'AUTORIZZAZIONE ALLA COSTRUZIONE E ALL'ESERCIZIO DI UN ELETTRODOTTO IN CAVO INTERRATO A 132KV NONCHÉ CABINA PRIMARIA, COSTITUENTE OPERA DI CONNESSIONE DI UN NUOVO STABILIMENTO INDUSTRIALE SITO IN COMUNE DI SIZIANO (PV). PROPONENTE: INFRASTRUCTURE ITALIA LAND 2 S.R.L..*

A seguito *di Procedura di Valutazione d'Impatto Ambientale ai sensi dell'art. 23 del D.lgs. 152/2006 e ss.mm.ii. relative al progetto "Data Center Stack Campus Siziano (PV)."[ID 14473], è stata richiesta documentazione integrativa da parte* COMMISSIONE TECNICA DI VERIFICA DELL'IMPATTO AMBIENTALE – VIA E VAS, tra le integrazioni richieste vi sono quelle relative ai campi elettromagnetici.

Orbene, la presente ***revisione 03*** recepisce le richieste di integrazioni solo relativamente all'elettrodotto in oggetto "*ELETTRODOTTO IN CAVO INTERRATO A 132KV NONCHÉ CABINA PRIMARIA, COSTITUENTE OPERA DI CONNESSIONE DI UN NUOVO STABILIMENTO INDUSTRIALE SITO IN COMUNE DI SIZIANO (PV). PROPONENTE: INFRASTRUCTURE ITALIA LAND 2 S.R.L.*"

> *Essendo, le altre richieste d'integrazioni riferite ad un progetto più ampio di cui questo fa parte, ma non esclusivo in termini di valutazione del campi elettromagnetici*

La valutazione dei campi elettromagneti riportata di seguito è riferita ad un livello di progettazione "definitiva" c.d. **P**iano **T**ecnico delle **O**pere, nel quale come prevede la norma. Il PTO ha lo scopo di valutare la fascia di rispetto ovvero la Distanza di Prima Approssimazione.

> ***Fascia di rispetto****: è lo spazio circostante un elettrodotto, che comprende tutti i punti, al di sopra e al di sotto del livello del suolo, caratterizzati da un'induzione magnetica di intensità maggiore o uguale all'obiettivo di qualità (3 μT). Come prescritto dall'articolo 4, c. 1 lettera h) della Legge Quadro n. 36 del 22 febbraio 2001, all'interno delle fasce di rispetto non è consentita alcuna destinazione di edifici ad uso residenziale, scolastico, sanitario e ad uso che comporti una permanenza non inferiore a quattro ore.*
>
> ***Distanza di Prima Approssimazione (DPA)****: per le linee è la distanza, in pianta sul livello del suolo, dalla proiezione del centro linea che garantisce che ogni punto la cui proiezione al suolo disti dalla proiezione del centro linea più della DPA si trovi all'esterno delle fasce di rispetto .*

In modo tale che l'elettrodotto in progetto non invade mai recettori sensibili esistenti e gli enti locali recepiscono all'interno dei propri strumenti attuativi la suddetta fascia di rispetto, che quindi, costituisce un vincolo di edificabilità di nuove costruzioni ad uso residenziale, scolastico, sanitario e ad uso che comporti una permanenza non inferiore a quattro ore.

Di conseguenza la presente non ha lo scopo di valutare il campo elettromagnetico in esercizio, ma di determinare il limite massimo.

Per cui solo in fase di progettazione esecutiva/esecuzione, dell'elettrodotto e delle Cabine Primarie in oggetto, a seguito di progettazione esecutiva Civile ed elettrica sarà possibile valutare l'effettivo campo elettromagnetico in esercizio.

2 PREMESSA

La presente relazione, ha lo scopo di evidenziare l'ottemperanza alla normativa vigente in merito ai campi elettrici e magnetici relativamente agli elettrodotti in cavo **AT 132 kV "SE-TERNA-LACCHIARELLA - C.P. INFRASTRUCTURE ITALIA LAND 2 S.R.L DI SIZIANO (PV)"** e **"C.P. INFRASTRUCTURE ITALIA LAND 2 S.R.L DI SIZIANO (PV) - C.P. INFRASTRUCTURE ITALIA LAND 1 S.R.L DI SIZIANO (PV)"** nonché della **C.P. INFRASTRUCTURE ITALIA LAND 2 S.R.L DI SIZIANO (PV).**

Tali valutazioni sono state fatte nel pieno rispetto del **D.P.C.M. dell'8 luglio 2003**, "*Fissazione dei limiti di esposizione, dei valori di attenzione e degli obiettivi di qualità per la protezione della popolazione dalle esposizioni ai campi elettrici e magnetici alla frequenza di rete (50 Hz) generati dagli elettrodotti*", nonché della "*Metodologia di calcolo per la determinazione delle fasce di rispetto per gli elettrodotti*", approvata con D.M. 29 maggio 2008 (pubblicato in G.U. n. 156 del 05/07/2008 – Supplemento Ordinario n. 160).

I valori indicati sono i seguenti:

- **Limite di esposizione**: 100 μT per l'induzione magnetica e 5 kV/m per il campo elettrico, intesi come valori efficaci;
- **Valore di attenzione**: 10 μT per l'induzione magnetica, da intendersi come mediana dei valori nell'arco delle 24 ore nelle normali condizioni di esercizio, da osservare negli ambienti abitativi, nelle aree gioco per l'infanzia, nelle scuole ed in tutti quei luoghi dove si soggiorna per più di quattro ore al giorno;
- **Obiettivo di qualità**: 3 μT per l'induzione magnetica, da intendersi come mediana dei valori nell'arco delle 24 ore nelle normali condizioni di esercizio, che deve essere rispettato nella progettazione dei nuovi elettrodotti in corrispondenza degli ambienti e delle aree definiti al punto precedente e nella progettazione dei nuovi insediamenti e delle nuove aree di cui sopra in prossimità di linee ed installazione elettriche esistenti.

Per "**fasce di rispetto**" si intendono quelle definite dalla **Legge 22 febbraio 2001 n° 36**, ovvero il volume racchiuso dalla curva isolivello a 3 μT, all'interno delle quali non è consentita alcuna destinazione di edifici ad uso residenziale, scolastico, sanitario, ovvero un uso che comporti una permanenza superiore a 4 ore, da determinare in conformità alla metodologia di cui al D.P.C.M. 08/07/2003.

Tale DPCM prevede (art. 6 comma 2) che l'APAT (ora ISPRA), sentite le ARPA, definisca la metodologia di calcolo per la determinazione delle fasce di rispetto con l'approvazione del Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare.

Con Decreto 29 maggio 2008 (pubblicato in G.U. n. 156 del 05/07/2008 – Supplemento Ordinario n. 160) il Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare ha approvato la metodologia di calcolo per la determinazione delle fasce di rispetto degli elettrodotti.

Le valutazioni delle fasce di rispetto e dei campi elettromagnetici effettuati nella presente relazione si riferiscono all'opera in oggetto composta dai seguenti interventi:

- elettrodotto AT 132 kV in cavo interrato "SE Terna di Lacchiarella – C.P. Infrastructure Italia Land 2 S.R.L di Siziano (PV)";
- elettrodotto AT 132 kV in cavo interrato "C.P. Infrastructure Italia Land 2 S.R.L di Siziano (PV) - C.P. Infrastructure Italia Land 1 S.R.L. di Siziano (PV)";
- C.P. Infrastructure Italia Land 2 S.R.L. di Siziano (PV).

Maggior dettagli sugli interventi sopra citati possono essere individuati nella relazione tecnica generale illustrativa.

Distanza di Prima Approssimazione (DPA): *per le linee è la distanza, in pianta sul livello del suolo, dalla proiezione del centro linea che garantisce che ogni punto la cui proiezione al suolo disti dalla proiezione del centro linea più della DPA si trovi all'esterno delle fasce di rispetto.*

La proiezione al suolo della fascia di rispetto insieme alle strutture interamente o in parte ricadenti all'interno della medesima fascia, e pertanto oggetto di approfondimenti nella presente relazione ai fini dello studio sull'esposizione al campo magnetico, sono riportati nei seguenti elaborati:

- SIL8-PT-AT-DPA-02_03, Planimetria catastale con indicazione delle D.P.A.;
- SIL8-PT-AT-DPA-03_03, Corografia su CTR con indicazione delle D.P.A.;
- SIL8-PT-AT-DPA-04_03, Orto-foto con indicazione delle D.P.A..

3 NORMATIVA DI RIFERIMENTO

Le linee guida per la limitazione dell'esposizione ai campi elettrici e magnetici variabili nel tempo ed ai campi elettromagnetici sono state indicate nel 1998 dalla ICNIRP (Commissione Internazionale per la Protezione dalle Radiazioni Non Ionizzanti).

Il 12-7-99 il Consiglio dell'Unione Europea (UE) ha emesso una Raccomandazione agli Stati Membri volta alla creazione di un quadro di protezione della popolazione dai campi elettromagnetici, che si basa sui migliori dati scientifici esistenti; a tale proposito il Consiglio ha avallato proprio le linee guida dell'ICNIRP. Successivamente nel 2001, a seguito di un'ultima analisi condotta sulla letteratura scientifica, un Comitato di esperti della Commissione Europea ha raccomandato alla UE di continuare ad adottare tali linee guida.

Lo Stato Italiano è successivamente intervenuto, con finalità di riordino e miglioramento della normativa in materia allora vigente in Italia attraverso la Legge quadro 36/2001, che ha individuato ben tre livelli di esposizione ed ha affidato allo Stato il compito di determinarli e aggiornarli periodicamente in relazione agli impianti che possono comportare esposizione della popolazione a campi elettrici e magnetici con frequenze comprese tra 0Hz e 300 GHz.

L'art. 3 della **Legge 36/2001** ha definito:

- *limite di esposizione* il valore di campo elettromagnetico da osservare ai fini della tutela della salute da effetti acuti;
- *valore di attenzione*, come quel valore del campo elettromagnetico da osservare quale misura di cautela ai fini della protezione da possibili effetti a lungo termine;
- *obiettivo di qualità*, come criterio localizzativo e standard urbanistico, oltre che come valore di campo elettromagnetico ai fini della progressiva minimizzazione dell'esposizione.

Tale legge quadro italiana, come ricordato dal citato Comitato di esperti della Commissione Europea, è stata emanata nonostante le raccomandazioni del Consiglio dell'Unione Europea del 12/07/99 sollecitassero gli Stati membri ad utilizzare le linee guida internazionali stabilite dall'ICNIRP. Tutti i paesi dell'Unione Europea hanno accettato il parere del Consiglio della UE, mentre l'Italia ha adottato misure più restrittive di quelle indicate dagli Organismi internazionali.

In esecuzione della predetta Legge quadro, è stato infatti emanato il **D.P.C.M. 08/07/2003** "*Fissazione dei limiti di esposizione, dei valori di attenzione e degli obiettivi di qualità per la protezione della popolazione dalle esposizioni ai campi elettrici e magnetici alla frequenza di rete (50 Hz) generati dagli elettrodotti.*", che ha fissato il limite di esposizione in 100 microtesla (μT) per l'induzione magnetica e 5 kV/m per il campo elettrico; ha stabilito il valore di attenzione di 10 μT, a titolo di cautela per la protezione da possibili effetti a lungo termine nelle aree gioco per l'infanzia, in ambienti abitativi, in ambienti scolastici e nei luoghi adibiti a permanenze non inferiori a quattro ore giornaliere; ha fissato, quale obiettivo di qualità, da osservare nella progettazione di nuovi elettrodotti, il valore di 3 μT. È stato altresì esplicitamente chiarito che tali valori sono da intendersi come mediana di valori nell'arco delle 24 ore, in condizioni normali di esercizio. Si segnala come i valori di attenzione e gli obiettivi di qualità stabiliti dal Legislatore italiano siano rispettivamente 10 e 33 volte più bassi se si considera il raffronto con le nuove Linee Guida ICNIRP.

Al riguardo è opportuno anche ricordare che, in relazione ai campi elettromagnetici, la tutela della salute viene attuata – nell'intero territorio nazionale – esclusivamente attraverso il rispetto dei limiti prescritti dal D.P.C.M. 08.07.2003, al quale soltanto può farsi utile riferimento.

In tal senso, con sentenza n. 307 del 7.10.2003 la **Corte Costituzionale ha dichiarato l'illegittimità di alcune leggi regionali in materia di tutela dai campi elettromagnetici**, per violazione dei criteri in tema di

ripartizione di competenze fra Stato e Regione stabiliti dal nuovo Titolo V della Costituzione[1]. Come emerge dal testo della sentenza, una volta fissati i valori-soglia di cautela per la salute, a livello nazionale, non è consentito alla legislazione regionale derogarli neanche in melius.

3.1 Richiamo delle Leggi di riferimento

- Regio Decreto 11 dicembre 1933 n° 1775 "Testo Unico delle disposizioni di legge sulle acque e impianti elettrici";
- Legge 23 agosto 2004, n. 239 "Riordino del settore energetico, nonché delega al Governo per il riassetto delle disposizioni vigenti in materia di energia";
- Legge 22 febbraio 2001, n. 36, "Legge quadro sulla protezione dalle esposizioni a campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici";
- DPCM 8 luglio 2003, "Fissazione dei limiti di esposizione, dei valori di attenzione e degli obiettivi di qualità per la protezione della popolazione dalle esposizioni ai campi elettrici e magnetici alla frequenza di rete (50 Hz) generati dagli elettrodotti";
- Decreto 29 maggio 2008, "Approvazione della metodologia di calcolo per la determinazione delle fasce di rispetto per gli elettrodotti";

[1] Nella sentenza (pag. 51 e segg.) si legge testualmente: *"L'esame di alcune delle censure proposte nei ricorsi presuppone che si risponda all'interrogativo se i valori–soglia (limiti di esposizione, valori di attenzione, obiettivi di qualità definiti come valori di campo), la cui fissazione è rimessa allo Stato, possano essere modificati dalla Regione, fissando valori–soglia più bassi, o regole più rigorose o tempi più ravvicinati per la loro adozione. La risposta richiede che si chiarisca la ratio di tale fissazione. Se essa consistesse esclusivamente nella tutela della salute dai rischi dell'inquinamento elettromagnetico, potrebbe invero essere lecito considerare ammissibile un intervento delle Regioni che stabilisse limiti più rigorosi rispetto a quelli fissati dallo Stato, in coerenza con il principio, proprio anche del diritto comunitario, che ammette deroghe alla disciplina comune, in specifici territori, con effetti di maggiore protezione dei valori tutelati (cfr. sentenze n. 382 del 1999 e n. 407 del 2002). Ma in realtà, nella specie, la fissazione di valori–soglia risponde ad una ratio più complessa e articolata. Da un lato, infatti, si tratta effettivamente di proteggere la salute della popolazione dagli effetti negativi delle emissioni elettromagnetiche (e da questo punto di vista la determinazione delle soglie deve risultare fondata sulle conoscenze scientifiche ed essere tale da non pregiudicare il valore protetto); dall'altro, si tratta di consentire, anche attraverso la fissazione di soglie diverse in relazione ai tipi di esposizione, ma uniformi sul territorio nazionale, e la graduazione nel tempo degli obiettivi di qualità espressi come valori di campo, la realizzazione degli impianti e delle reti rispondenti a rilevanti interessi nazionali, sottesi alle competenze concorrenti di cui all'art. 117, terzo comma, della Costituzione, come quelli che fanno capo alla distribuzione dell'energia e allo sviluppo dei sistemi di telecomunicazione. Tali interessi, ancorché non resi espliciti nel dettato della legge quadro in esame, sono indubbiamente sottesi alla considerazione del "preminente interesse nazionale alla definizione di criteri unitari e di normative omogenee" che, secondo l'art. 4, comma 1, lettera a, della legge quadro, fonda l'attribuzione allo Stato della funzione di determinare detti valori–soglia. In sostanza, la fissazione a livello nazionale dei valori–soglia, non derogabili dalle Regioni nemmeno in senso più restrittivo, rappresenta il punto di equilibrio fra le esigenze contrapposte di evitare al massimo l'impatto delle emissioni elettromagnetiche, e di realizzare impianti necessari al paese, nella logica per cui la competenza delle Regioni in materia di trasporto dell'energia e di ordinamento della comunicazione è di tipo concorrente, vincolata ai principi fondamentali stabiliti dalle leggi dello Stato. Tutt'altro discorso è a farsi circa le discipline localizzative e territoriali. A questo proposito è logico che riprenda pieno vigore l'autonoma capacità delle Regioni e degli enti locali di regolare l'uso del proprio territorio, purché, ovviamente, criteri localizzativi e standard urbanistici rispettino le esigenze della pianificazione nazionale degli impianti e non siano, nel merito, tali da impedire od ostacolare ingiustificatamente l'insediamento degli stessi".*

- DPR 8 giugno 2001 n°327 "Testo unico delle disposizioni legislative e regolamentari in materia di Pubblica Utilità" e ss.mm.ii.;
- Legge 24 luglio 1990 n° 241, "Norme sul procedimento amministrativo in materia di conferenza dei servizi" come modificato dalla Legge 11 febbraio 2005, n. 15, dal Decreto legge 14 marzo 2005, n. 35 e dalla Legge 2 aprile 2007, n. 40;
- Decreto Legislativo 22 gennaio 2004 n° 42 "Codice dei Beni Ambientali e del Paesaggio, ai sensi dell'articolo 10 della legge 6 luglio 2002, n. 137";
- Decreto del Presidente del Consiglio dei Ministri 12 dicembre 2005 "Individuazione della documentazione necessaria alla verifica della compatibilità paesaggistica degli interventi proposti, ai sensi dell'articolo 146, comma 3, del Codice dei beni culturali e del paesaggio di cui al decreto legislativo 22 gennaio 2004, n. 42";
- Decreto Legislativo 3 aprile 2006, n. 152 "Norme in materia ambientale" e ss.mm.ii.;
- Legge 5 novembre 1971 n. 1086. "Norme per la disciplina delle opere di conglomerato cementizio armato, normale e precompresso ed a struttura metallica. Applicazione delle norme sul cemento armato";
- Decreto Interministeriale 21 marzo 1968 n. 449 "Approvazione delle norme tecniche per la progettazione, l'esecuzione e l'esercizio delle linee aeree esterne";
- Decreto Interministeriale 16 gennaio 1991 n. 1260 "Aggiornamento delle norme tecniche per la disciplina della costruzione e dell'esercizio di linee elettriche aeree esterne";
- Decreto Interministeriale del 05/08/1998 "Aggiornamento delle norme tecniche per la progettazione, esecuzione ed esercizio delle linee elettriche aeree esterne";

3.2 Richiamo delle Norme tecniche di riferimento

3.2.1 Norme CEI

- CEI 11-4, "Norme tecniche per la costruzione di linee elettriche aeree esterne", sesta edizione, 2011:01 sostituita da CEI EN 50341-2-13/A1 "Linee elettriche aeree con tensione superiore a 1 kV in c.a.", 2017:09
- CEI 11-60, "Portata al limite termico delle linee elettriche aeree esterne", seconda edizione, 2002-06
- CEI 11-17, "Impianti di produzione, trasmissione e distribuzione dell'energia elettrica – Linee in cavo", terza edizione, 2006-07
- CEI 211-4, "Guida ai metodi di calcolo dei campi elettrici e magnetici generati da linee elettriche", seconda edizione, 2008-09

- CEI 211-6, "Guida per la misura e per la valutazione dei campi elettrici e magnetici nell'intervallo di frequenza 0 Hz - 10 kHz, con riferimento all'esposizione umana", prima edizione, 2001-01
- CEI 103-6 "Protezione delle linee di telecomunicazione dagli effetti dell'induzione elettromagnetica provocata dalle linee elettriche vicine in caso di guasto", terza edizione, 1997:12
- CEI 106-11, "Guida per la determinazione delle fasce di rispetto per gli elettrodotti secondo le disposizioni del DPCM 8 luglio 2003 (Art. 6) - Parte 1: Linee elettriche aeree e in cavo", prima edizione, 2006:02

3.2.2 Norme tecniche diverse

- Unificazione TERNA, "Linee in cavo AT";
- UX LK401 Prescrizioni per il progetto elettrico e la progettazione del tracciato dei collegamenti in cavo;
- UX LK411 Prescrizioni per l'esecuzione delle opere civili connesse alla posa dei cavi.

4 CARATTERISTICHE DELL' ELETTRODOTTO IN CAVO OGGETTO DI VALUTAZIONE DEL CAMPO ELETTRICO E MAGNETICO

4.1 Caratteristiche principali elettriche dell' elettrodotto oggetto di nuova costruzione

Di seguito sono sintetizzate le principali caratteristiche elettriche dell'elettrodotto che si intende realizzare o che necessita prendere in esame per lo studio dei campi elettromagnetici.

Relativamente alle caratteristiche elettriche è opportuno osservare che la corrente nominale rappresenta un valore convenzionale di corrente da non confondere con la portata in corrente in servizio normale (PCNS) del conduttore, definita dalla norma CEI 11-60 e ***che sarà utilizzata ai fini della valutazione del campo di induzione magnetica e per le fasce di rispetto.*** [2]

4.1.1 Caratteristiche principali dell'elettrodotto in cavo a 132 kV

L'elettrodotto, sarà costituito da terne di cavi unipolari, con isolamento in XLPE (polietilene reticolato), costituiti da un conduttore a corda rotonda compatta (tipo milliken) di rame ricotto non stagnato oppure di alluminio, avente sezione pari a 1600 mmq.

---

[2] ***Portata in corrente in servizio normale:*** *è la corrente che può essere sopportata da un conduttore per il 100% del tempo con limiti accettabili del rischio di scarica sugli oggetti mobili e sulle opere attraversate e dell'invecchiamento. Essa è definita nella norma CEI 11-60 § 2.6.*
La corrente di calcolo per la determinazione delle fasce di rispetto è la "portata di corrente in servizio normale relativa al periodo stagionale in cui essa è più elevata":
· per le linee con tensione >100 kV, è definita dalla norma CEI 11-60; · per gli elettrodotti aerei con tensione <100 kV, i proprietari/gestori fissano la portata in corrente in regime permanente in relazione ai carichi attesi con riferimento alle condizioni progettuali assunte per il dimensionamento dei conduttori; · per le linee in cavo è definita dalla norma CEI 11-17 § 3.5 e § 4.2.1 come portata in regime permanente (massimo valore della corrente che, in regime permanente e in condizioni specificate, il conduttore può trasmettere senza che la sua temperatura superi un valore specificato) .

Le caratteristiche elettriche dell'elettrodotto in cavo da realizzare e le caratteristiche dei cavi utilizzati considerate per il calcolo dei campi elettrico e magnetico sono le seguenti:

PARAMETRO	VALORE
Frequenza nominale	50 Hz
Tensione nominale	132 kV
Corrente nominale	1000 A
portata in corrente in servizio normale (PCNS)	**800A**
Potenza nominale	**183 MVA**
Sezione nominale del conduttore	1600 mm^2
Isolante	XLPE
Diametro esterno massimo	121.8 mm

ΔV	I	**P**
V	A	**MVA**
132000	800	**183**

4.2 Caratteristiche geometriche dell'elettrodotto in cavo

Per gli elettrodotti in esame, la posa è in singola terna (ST) a "trifoglio" il cui schema tipico è rappresentato in Figura 2.

Per un breve tratto nel comune di Siziano (PV), è prevista la posa a doppia terna, alloggiate in un unico scavo con setto separatore, di cui una sola in esercizio. L'altra, che sarà utilizzata solo in caso di guasto, è pensata per aumentare la ridondanza di alimentazione e la resilienza del sistema di trasmissione garantendo una sicura continuità del servizio. Per completezza, in Figura 1 è riportato il tipologico di posa.

La scelta di tale schema di posa è motivata dal passaggio degli elettrodotti in aree urbane: i valori del campo magnetico degli elettrodotti posati con lo schema a "Trifoglio" sono inferiori rispetto a quelli assunti dallo stesso campo relativamente ad elettrodotti posati con schema in "Piano".

Con lo schema di posa a "Trifoglio" il campo magnetico assume valori trascurabili già a pochissimi metri dall'asse linea, a profondità di posa è di 1,5/1,6 m.

Nel caso di terne affiancate entrambe in esercizio la distanza tra l'asse delle terne è pari a cm 0.85. Nel caso di specie, per il calcolo dei campi elettromagnetici, si sono considerate le due ipotesi;

- Una sola terna attiva;

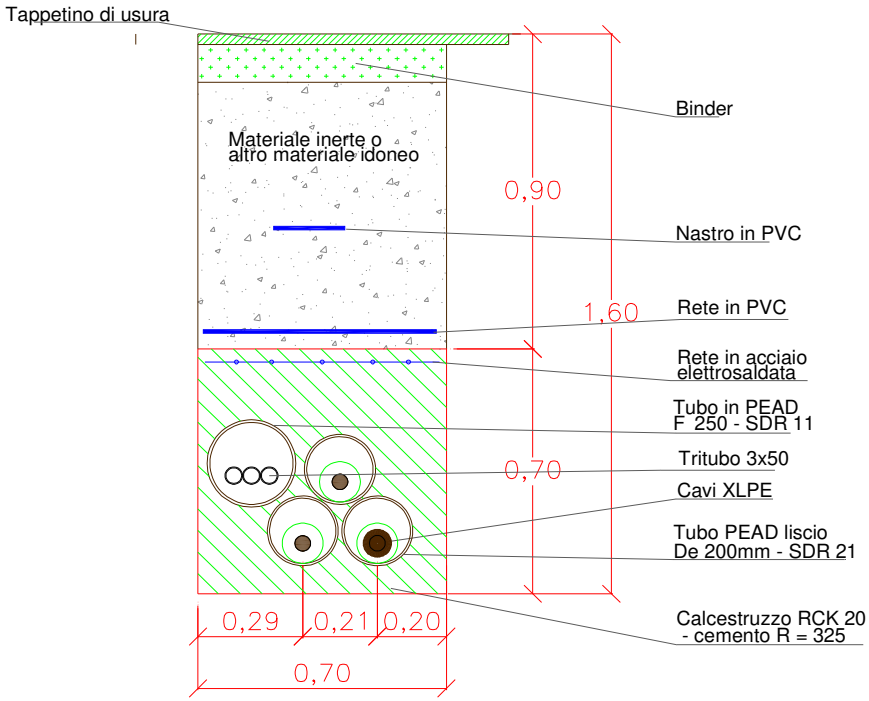


Figura 2 - Posa a trifoglio su strada

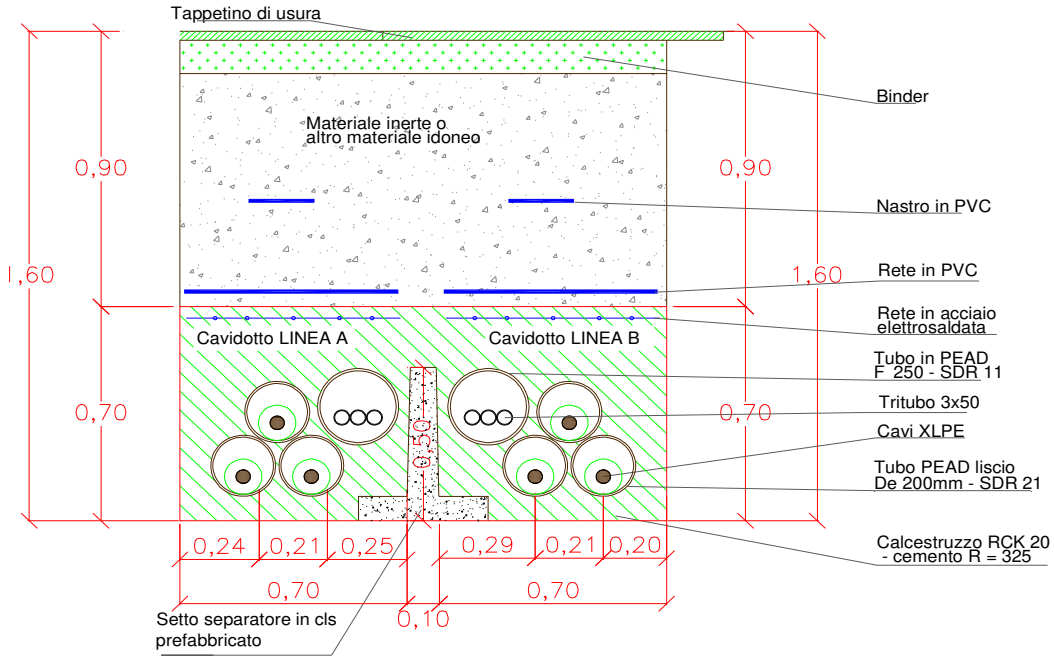


Figura 1 - Posa a trifoglio in doppia terna

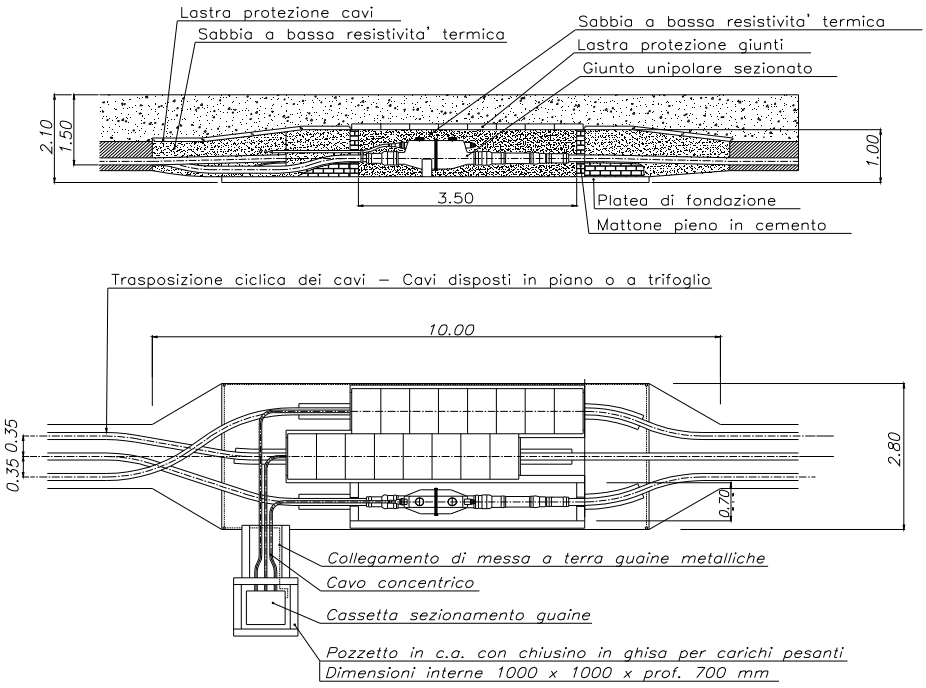
- Entrambe le due terne attive,

La fascia di rispetto riportato sugli elaborati grafici è stata determinata considerando il valore massimo di DPA , corrispondente alla condizione che entrambe le terne sono in esercizio, operando quindi, in sicurezza.

Problemi legati al trasporto e messa in opera dei cavi fanno sì che, in genere, non si realizzino pezzature di cavo superiori ai seicento-settecento metri; ecco quindi la necessità di realizzare dei giunti, per elettrodotti di lunghezza superiore.

Piochè nelle buche giunti la disposizione dei cavi è in piano allargati,

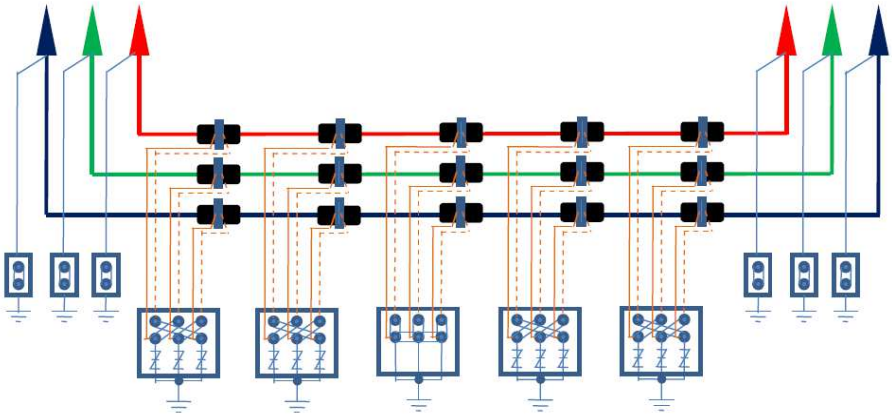
PARTICOLARE BUCA GIUNTO



la DPA è maggiore, pertanto particolare attenzione sarà fatta in prossimità delle buche giunti, considerato:

- che la modalità **normale** di collegamento degli schemi metallici è il cross bonding

CROSS BONDING



- che tale modalità presuppone che i giunti siano pasti ad intervalli regolari, cioè le tratte/ pezzature devono essere preferibilmente tutte uguali.

La fascia di rispetto/DPA relativa alla posa in pano allargata (tipica delle buche giunti) sarà estesa per ± 25 metri rispetto alla posizione ipotizzata in sede di redazione del PTO.

Qualora il progetto esecutivo/esecuzione (as built) comporti variazioni sostanziali al tracciato o alla dislocazione delle buche giunti, sarà cura del committente rielaborare e ripresentare presso gli enti preposti la nuova valutazione dei campi elettromagnetici.

4.3 Disposizione delle fasi

Così come previsto dal documento ISPRA "Disposizioni integrative/interpretative linee guida decreti 29/05/2008", per ogni elettrodotto esistente o in progetto che sia oggetto della presente analisi tecnica sui campi elettromagnetici, sarà considerata la reale disposizione geometrica delle fasi elettriche.

4.4 Valori di corrente caratteristici degli elettrodotti interessati e/o interferenti

I valori di corrente caratteristici degli elettrodotti di nuova costruzione, oggetto di variante o semplicemente interferenti sono:

- **Portata in corrente in servizio normale**:
  - Per **elettrodotti in cavo**, è portata di corrente così come definita dalla norma **Norma CEI 20-21 "Calcolo delle portate dei cavi elettrici. Parte 1: in regime permanente (fattore di carico 100%)" Ed- 2007**
- **Intensità di corrente nominale**: valore convenzionale di corrente di un elettrodotto.
- **Corrente mediana giornaliera massima**: valore della massima mediana giornaliera transitata sull'elettrodotto e registrata negli anni precedenti.
- **Corrente massima storica**: valore massimo di corrente transitata sull'elettrodotto negli anni precedenti.
- **Corrente media**: valore medio di corrente transitata sull'elettrodotto negli anni precedenti.

Nella seguente tabella si riportano i suddetti valori per l'elettrodotto oggetto di analisi nella presente relazione tecnica. Per le correnti massime si riportano i valori relativi al **periodo climatico più sfavorevole**.

ASSET [NUOVO/ ESISTENTE]	NOME COLLEGAMENTO	TENSIONE [kV]	ST/DT	TIPO	CONDUTTORE	ZONA	CORRENTI MASSIME		VALORI REGISTRATI		
							LIMITE FUNZ.	PORTATA CORRENTE SERVIZIO NORMALE	MAX MEDIANA 24 h	MAX	MEDIA
							[A]	[A]	[A]	[A]	[A]
N	- SE Terna Lacchiarella – CP Infrastructure Italia Land 2 S.R.L." - C.P. Infrastructure Italia Land 2 S.r.l di Siziano (PV) - C.P. Infrastructure Italia Land 1 S.r.l di Siziano (PV)	132	ST	Cavo	Cavo: 1 x Al 1600 mm²	N.A.	N.A.	Cavo: 800 (IEC 60287)	N.A.	N.A.	N.A.

5 VALUTAZIONE CAMPO ELETTRICO

5.1 Valutazione campo elettrico per l'elettrodotto in cavo interessato dall'opera

Nel caso di cavi interrati, la presenza dello schermo e la relativa vicinanza dei conduttori delle tre fasi elettriche rende di fatto il campo elettrico nullo ovunque. Pertanto il rispetto della normativa vigente in corrispondenza dei recettori interessati è sempre garantito indipendentemente dalla distanza degli stessi dall'elettrodotto. Non si riporta rappresentazione del calcolo del campo elettrico prodotto dalla linea in cavo, poiché **il campo elettrico esterno al cavo è nullo**.[3]

5.2 VALUTAZIONE DEL CAMPO ELETTRICO DELLE CABINE PRIMARIE

Utilizzando la stessa configurazione geometrica utilizzata per il calcolo dell'induzione magnetica, viene calcolato il valore di campo elettrico generato dalle sbarre della Cabina primaria .

Per il calcolo è stato utilizzato il software open source free della WebNIR inoltre, i calcoli sono stati eseguiti in conformità a quanto disposto dal D.P.C.M. 08/07/2003.

Per quanto riguarda l'altezza da terra dei conduttori, è stata considerata la distanza minima di 4.50 m come previsto dal DM 449 del 1988 ss.mm.ii.

Con tali ipotesi è stato verificato, per ogni configurazione geometrica, **il pieno rispetto dell'obiettivo di qualità dettato dal DPCM dell'8 luglio 2003 (5 kV/m)**.

Nella figura seguente è riportato il calcolo del campo elettrico generato dalle linee 132 kV presa in considerazione. I valori esposti sono stati calcolati ad un'altezza di 0 m dal suolo.
Come si vede i valori di campo elettrico sono sempre inferiori al limite di 5 kV/m imposto dalla normativa, considerando come limite fisico la recinzione della Cabina primaria.

[3] **NORMA CEI 11-17-PUNTO 6.5.2.2 Campi elettrici dovuti a linee in cavo schermato**
Lo schermo dei cavi è sufficiente a ridurre il campo elettrico a livelli trascurabili.

5.2.1 Cabina Primaria MIL08

Calcolo del campo elettrico generato da sistemi di conduttori rettilinei indefiniti

Presentazione | Inserimento dati | Risultati | Istruzioni

Definizione della struttura dei sistemi di conduttori

Numero di sistemi: 1

Tipo di tensione: Alternata trifase

1

Parametri generali della struttura n. 1

Nome della struttura: CP_LAND2

Altezza da terra del conduttore più basso: 4,5 m

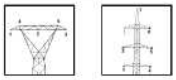
Distanza dall'origine, lungo il terreno: 0,0 m

Parametro utilizzato nel caso di conduttori a fascio:

- (●) Raggio della circonferenza
- ( ) Spaziatura tra i subconduttori

Utilizzo facoltativo di sostegni a massimo impatto

Tensione efficace nominale tra le fasi: 132 kV



Prima di selezionare il tipo di sostegno, assicurarsi che il tipo di tensione sia corretto. Se impostata su "Alternata monofase" o "Continua" l'inserimento delle fasi viene disabilitato, e il valore di tensione non viene compilato automaticamente.

Parametri dei conduttori della struttura n. 1

N. conduttori (fino a 30): 6

X (m)	Y (m)	Tipo	V (kV) ↓	Fase (°)	r (mm) ↓	n ↓	R / s ↓
-9,1	0	F	76,2102	0	30	1	35
-6,90	0	F	76,2102	120	30	1	35
-4,7	0	F	76,2102	240	30	1	35
4,7	0	F	76,2102	0	30	1	35
6,90	0	F	76,2102	120	30	1	35
9,1	0	F	76,2102	240	30	1	35

Replica questi parametri alla struttura n. --

Posizione dei punti di calcolo lungo il piano di terra

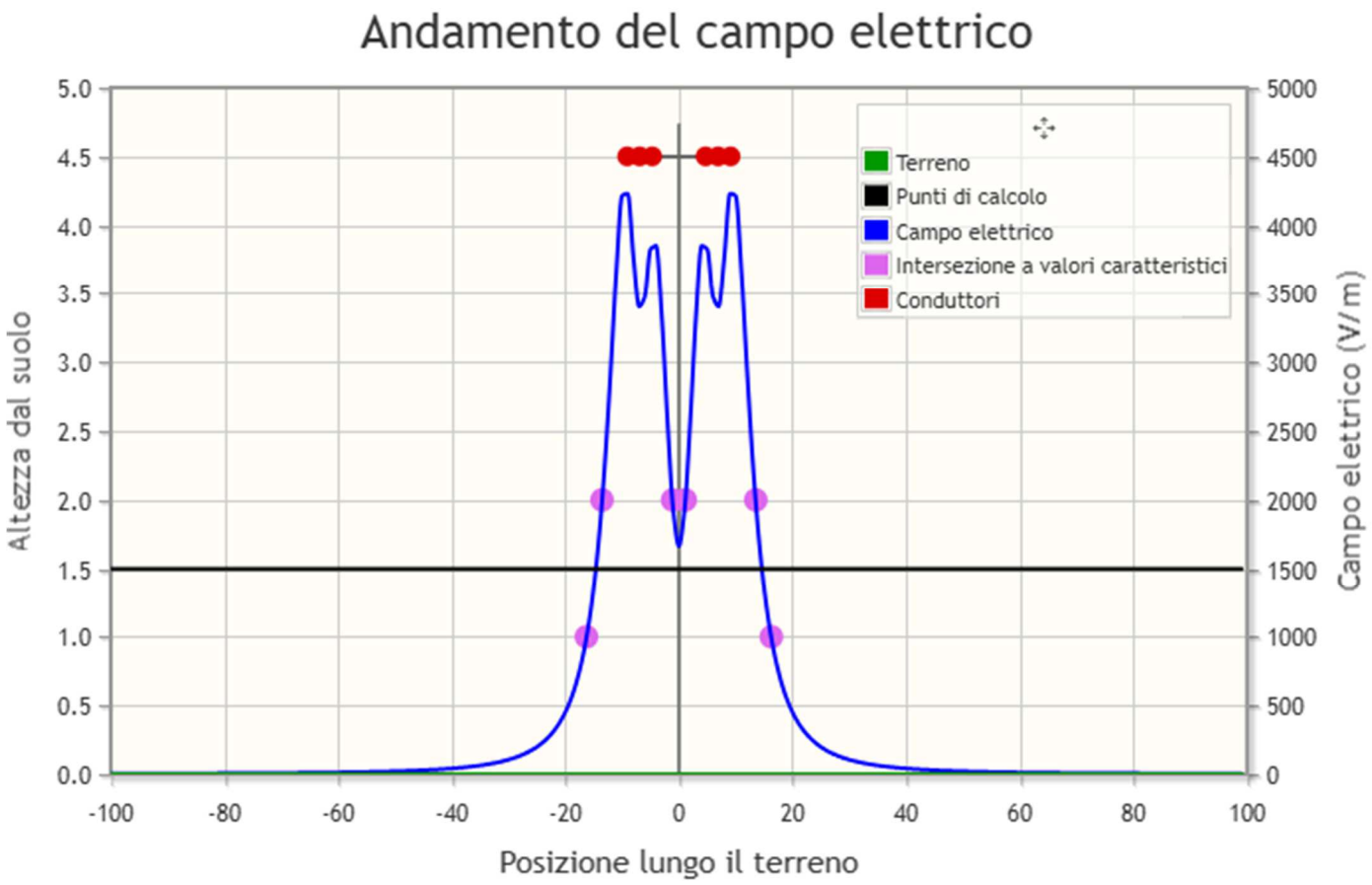
Distanza iniziale: -100 m

Passo: 1 m

Numero di punti: 200

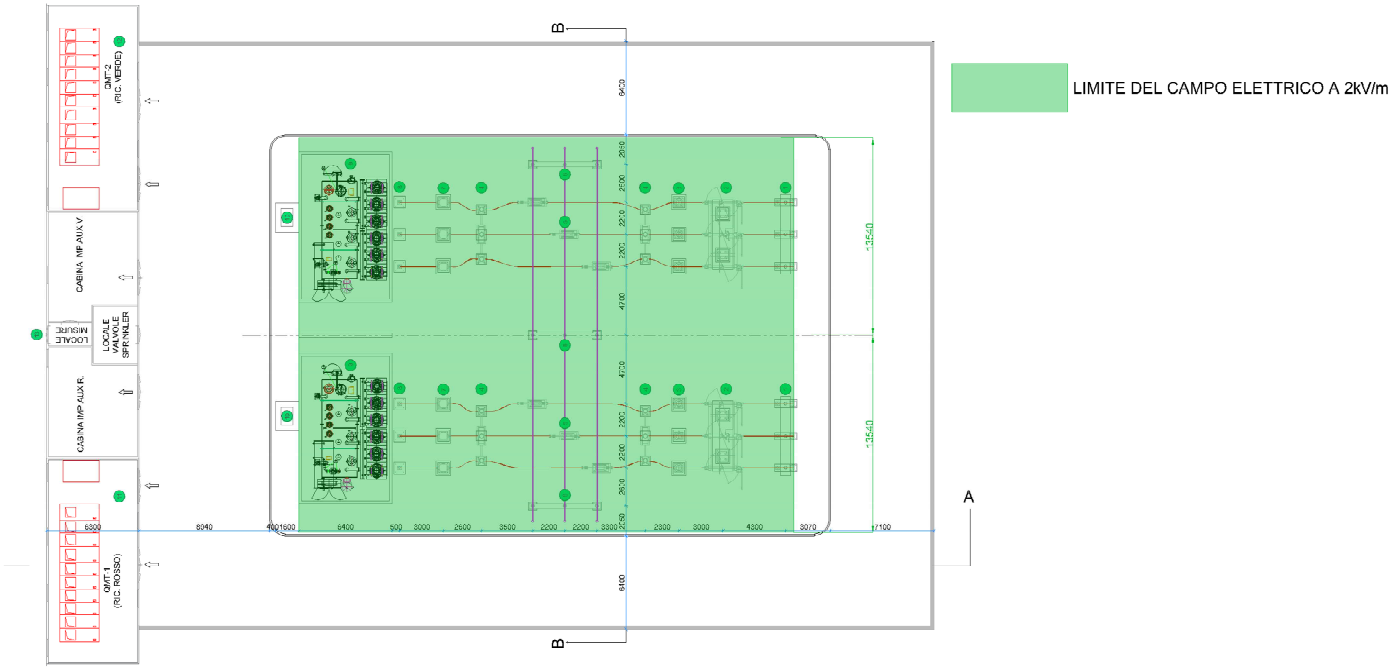
Altezza sul terreno: 1,5 m

Pendenza del terreno: 0 °



Posizioni di intersezione con valori caratteristici

Valore	Posizioni
1 kV/m	-16.27 m 16.27 m
2 kV/m	-13.54 m -1.11 m 1.11 m 13.54 m



Come si evince dal grafico il limite dei 5kV/m è sempre rispettato.

5.2.2 Cabina Primaria MIL01

Calcolo del campo elettrico generato da sistemi di conduttori rettilinei indefiniti

Presentazione | Inserimento dati | Risultati | Istruzioni

Definizione della struttura dei sistemi di conduttori

Numero di sistemi: 1

Tipo di tensione: Alternata trifase

1

Parametri generali della struttura n. 1

Nome della struttura: CP_LAND2

Altezza da terra del conduttore più basso: 4,5 m

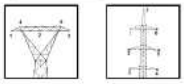
Distanza dall'origine, lungo il terreno: 0,0 m

Parametro utilizzato nel caso di conduttori a fascio:

- (●) Raggio della circonferenza
- ( ) Spaziatura tra i subconduttori

Utilizzo facoltativo di sostegni a massimo impatto

Tensione efficace nominale tra le fasi: 132 kV



Prima di selezionare il tipo di sostegno, assicurarsi che il tipo di tensione sia corretto. Se impostata su "Alternata monofase" o "Continua" l'inserimento delle fasi viene disabilitato, e il valore di tensione non viene compilato automaticamente.

Parametri dei conduttori della struttura n. 1

N. conduttori (fino a 30): 6

X (m)	Y (m)	Tipo	V (kV)	Fase (°)	r (mm)	n	R / s
-8,2	0	F	76,2102	0	30	1	35
-6	0	F	76,2102	120	30	1	35
-3,8	0	F	76,2102	240	30	1	35
3,8	0	F	76,2102	0	30	1	35
6	0	F	76,2102	120	30	1	35
8,2	0	F	76,2102	240	30	1	35

Replica questi parametri alla struttura n. –

Posizione dei punti di calcolo lungo il piano di terra

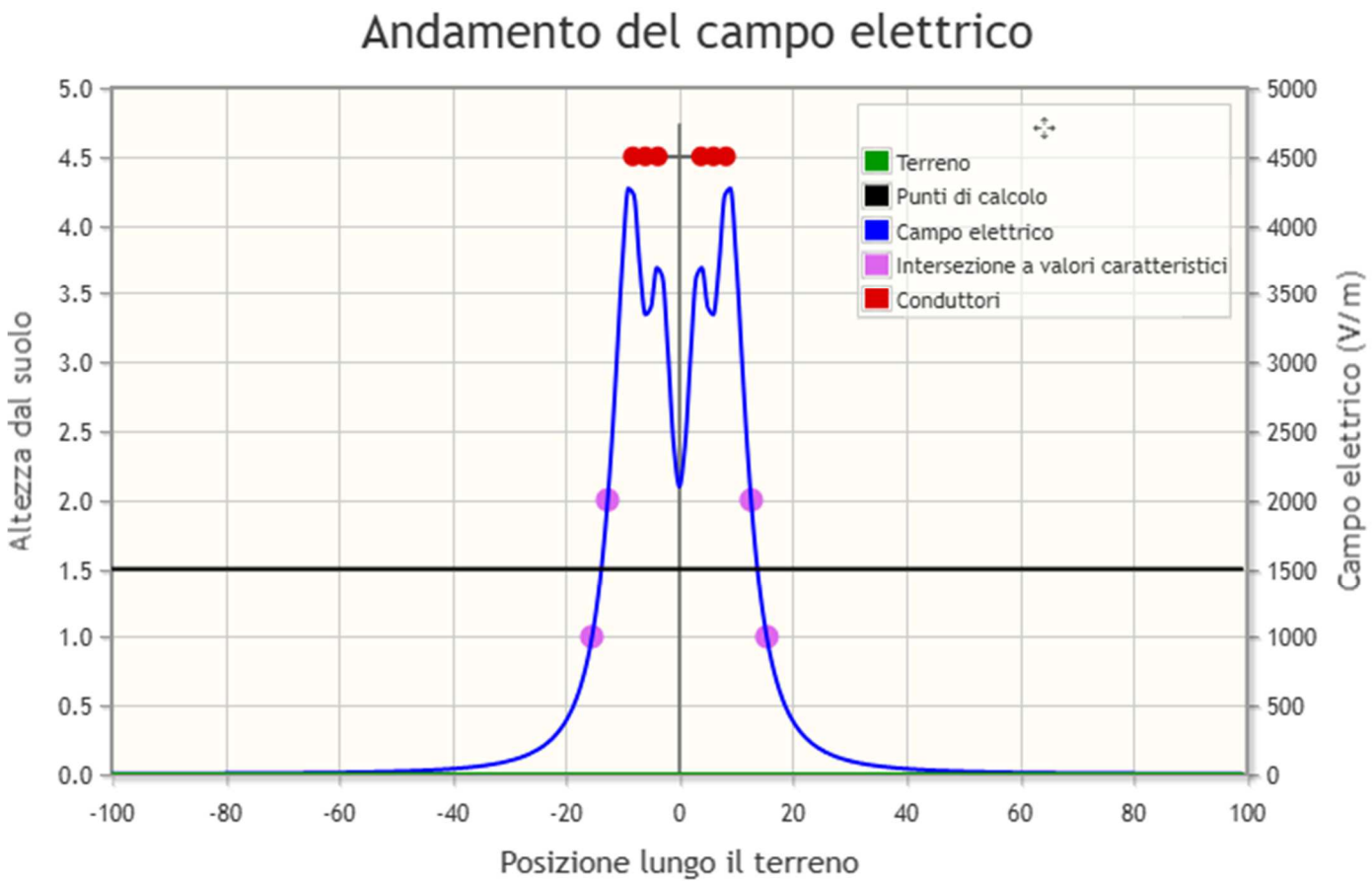
Distanza iniziale: -100 m

Passo: 1 m

Numero di punti: 200

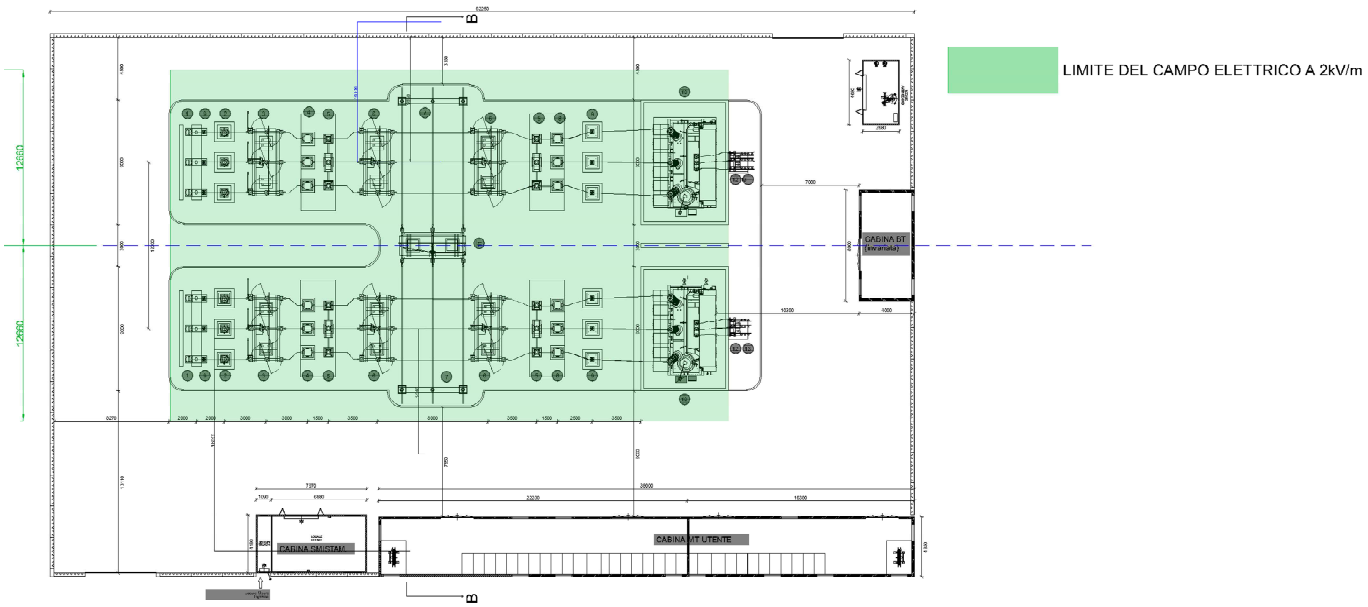
Altezza sul terreno: 1,5 m

Pendenza del terreno: 0 °



Posizioni di intersezione con valori caratteristici

Valore	Posizioni
1 kV/m	-15.42 m 15.42 m
2 kV/m	-12.66 m 12.66 m



Come si evince dal grafico il limite dei 5kV/m è sempre rispettato.

6 VALUTAZIONE DELLE FASCE DI RISPETTO E DELL'INDUZIONE MAGNETICA

6.1 Definizioni

Per **"fasce di rispetto**" si intendono quelle definite dalla Legge 22 febbraio 2001 n° 36, all'interno delle quali non è consentita alcuna destinazione di edifici ad uso residenziale, scolastico, sanitario, ovvero un uso che comporti una permanenza superiore a 4 ore, da determinare in conformità alla metodologia di cui al D.P.C.M. 08/07/2003.

Tale DPCM prevede (art. 6 comma 2) che l'APAT, sentite le ARPA, definisca la metodologia di calcolo per la determinazione delle fasce di rispetto con l'approvazione del Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare.

Con Decreto 29 maggio 2008 (pubblicato in G.U. n. 156 del 05/07/2008 – Supplemento Ordinario n. 160) il Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare ha approvato la metodologia di calcolo per la determinazione delle fasce di rispetto degli elettrodotti.

Al fine di semplificare la gestione territoriale e il calcolo delle fasce di rispetto, il Decreto 29 Maggio 2008 prevede che il gestore debba calcolare la "distanza di prima approssimazione (DPA)", definita come "la distanza in pianta sul livello del suolo, dalla proiezione del centro linea, che garantisce che ogni punto la cui proiezione al suolo disti dalla proiezione del centro linea più di DPA si trovi all'esterno delle fasce di rispetto".

6.2 Metodologia di valutazione

Per la valutazione delle fasce di rispetto e del campo di induzione magnetica relativamente ai potenziali recettori interessate si procederà utilizzando la seguente metodologia:

- ***Step 1***: si procede alla valutazione tridimensionale del campo di induzione magnetica immaginando la sovrapposizione degli effetti generati da tutti gli elettrodotti (esistenti e di nuova costruzione) nelle reali condizioni di installazione, ipotizzando circolante la massima corrente. Si calcola la **fascia di rispetto** e, quindi, la sua proiezione al suolo;
- ***Step 2***: si individuano le **strutture interessate** che ricadono all'interno della proiezione della fascia di rispetto. Esse vengono categorizzate attraverso l'analisi della documentazione catastale, delle carte tecniche regionali e da sopralluoghi in sito.
- ***Step 3***: si effettua una valutazione di campo di induzione magnetica, considerando sempre le condizioni reali di installazione, considerando il solo contributo degli elettrodotti esistenti. Così come previsto dalla metodologia di cui al **documento ISPRA "Disposizioni integrative/interpretative sui decreti del 29/05/2008"**, si utilizza, come valore di corrente di esercizio, la massima mediana giornaliera nelle 24 ore. Per i recettori interessate all'interno della proiezione della fascia di rispetto si è quindi calcolato un valore di induzione magnetica denominato B_{max}
- ***Step 4***: si effettua una valutazione di campo di induzione magnetica, considerando sempre le condizioni reali di installazione per gli elettrodotti esistenti e di nuova costruzione, considerando come correnti circolanti:
    - Per gli elettrodotti esistenti: il valore massimo della mediana giornaliera nelle 24 ore;
    - Per gli elettrodotti di nuova costruzione: il valore della portata di corrente in servizio normale così come definita dalla norma CEI 11-60

  A conclusione di questa fase, per i recettori interessate, sarà stato determinato il valore cumulato denominato B_{TOT}. Questo valore tiene conto dell'effetto cumulato generato dagli elettrodotti esistenti e da quelli di nuova realizzazione;
- ***Step 5***: si procede quindi a verificare che la realizzazione dei nuovi elettrodotti non peggiori sostanzialmente l'esposizione al campo di induzione magnetica. La verifica per i singoli recettori sarà la seguente:

$$B_{TOT} \leq 3 \quad \text{se} \quad B_{MAX}<3$$

$$B_{TOT} \leq B_{MAX} +0.1 \quad \text{se} \quad B_{MAX}\geq 3$$

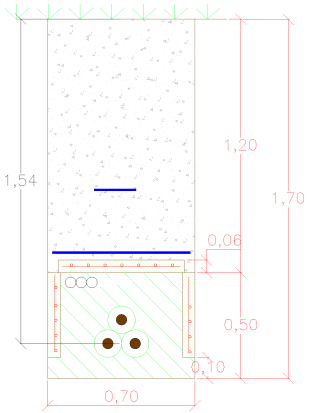
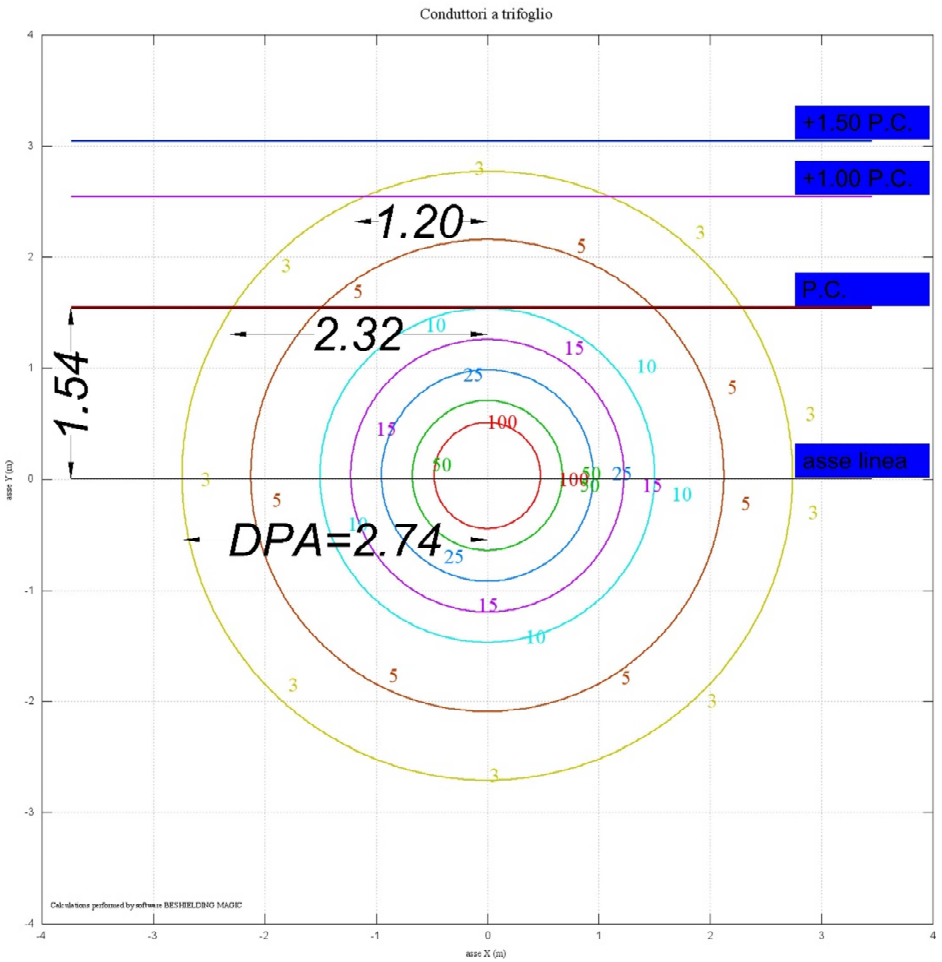
6.3 Calcolo delle fasce di rispetto

Per il calcolo della fascia di rispetto ovvero della DPA, per il collegamento in progetto, composti dalla parte in cavo e dell'area della C.P., sono state presi in considerazione i seguenti valori di corrente:

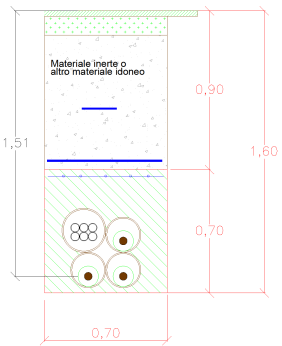
NUOVO/ ESISTENTE	NOME COLLEGAMENTO	TENSIONE [kV]	ST/ DT	TIPO	CONDUTTORE	ZONA	CORRENTI MASSIME	
							LIMITE FUNZ.	PORTATA CORRENTE SERVIZIO NORMALE
							[A]	[A]
N	- SE Terna Lacchiarella – CP Infrastructure Italia Land 2 S.R.L." - C.P. Infrastructure Italia Land 2 S.r.l di Siziano (PV) - C.P. Infrastructure Italia Land 1 S.r.l di Siziano (PV)	132	ST	Cavo	Cavo: 1 x Al 1600 mm²	N.A.	N.A.	Cavo: 800 (IEC 60287)

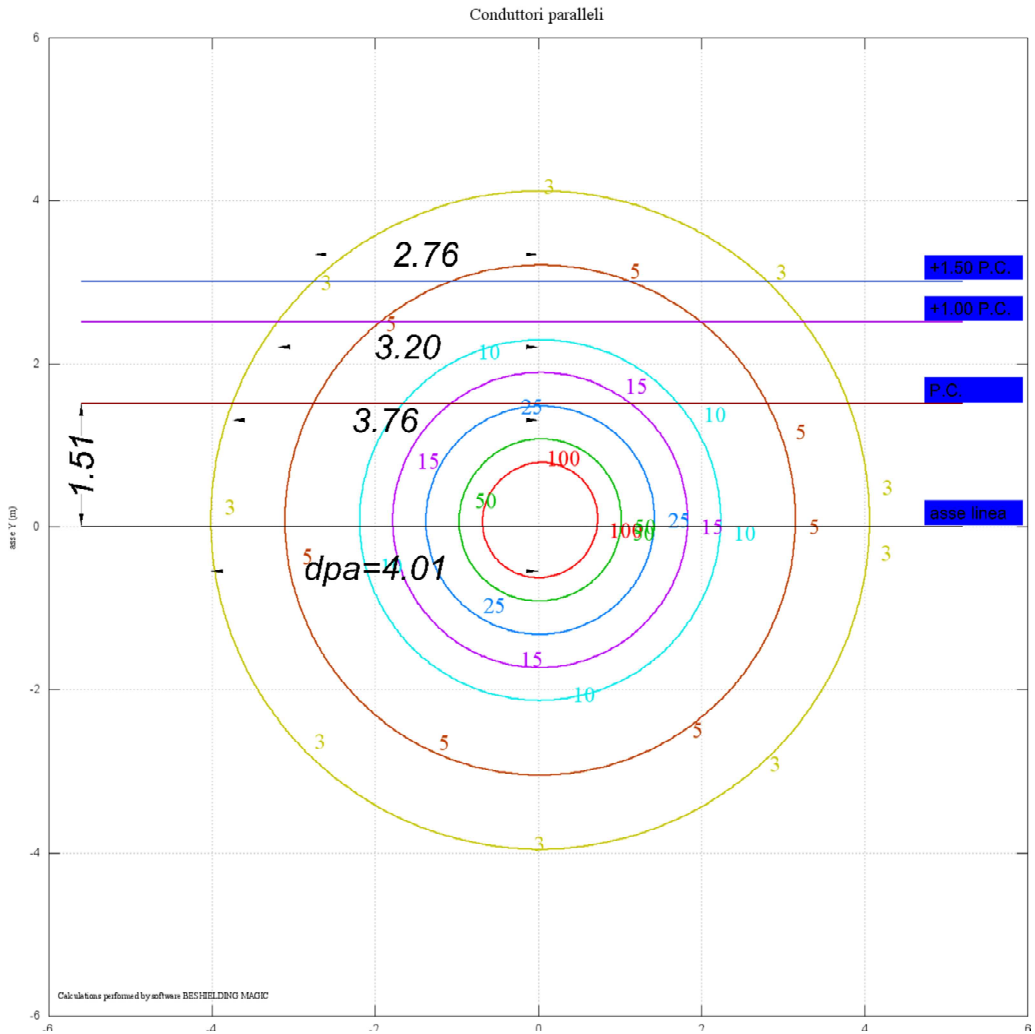
6.3.1 Calcolo delle fasce di rispetto per la linea in cavo

Il valore del campo magnetico generato da un elettrodotto in cavo e la rispettiva fascia di rispetto in presenza o meno di canaletta schermante o di loop passivi può essere ottenuta utilizzando il programma "MAGIC® – Magnetic Induction Calculation" sviluppato da BEShielding S.r.l. in aderenza alla norma CEI 211-4 ed in conformità a quanto disposto dal DPCM 08/07/03. La tabella di seguito riportata sintetizza i risultati ottenuti dalle simulazioni, nel caso di un elettrodotto a 132kV con la corrente nominale di 800°.

DESCRIZIONE	DISPOSIZIONE ESEMPLIFICATIVA	VALORE CAMPO INDUZIONE MAGNETICA [µT]	VALORE FASCIA RISPETTO [m]
Elettrodotto in cavo ST con posa a trifoglio			**2,74 m** ***(raggio del cilindroide)*** ***Ovvero DPA***

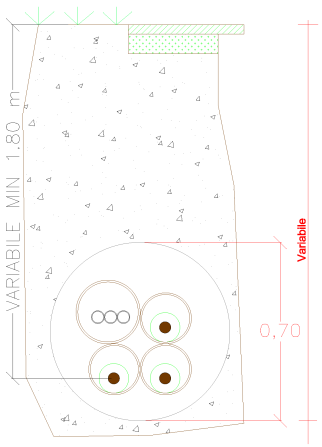
Elettrodotto in cavo ST con posa in tubiera

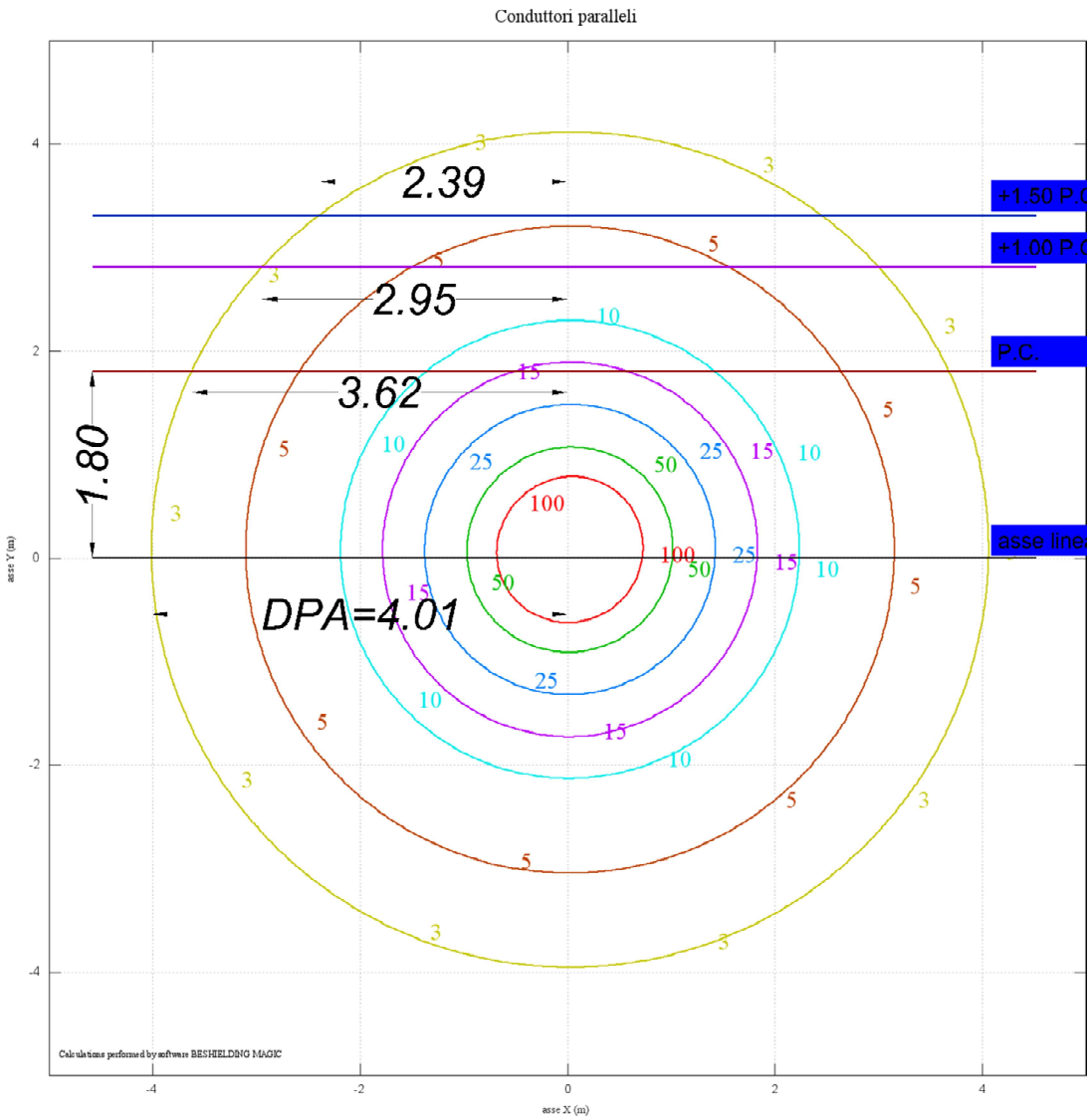




4.01 m
(raggio del cilindroide)
Ovvero DPA

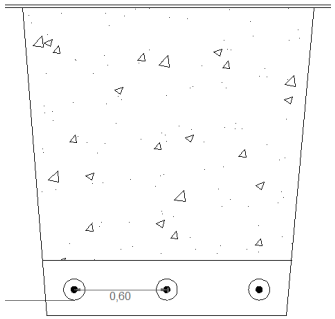
Elettrodotto in cavo ST con posa in T.O.C.

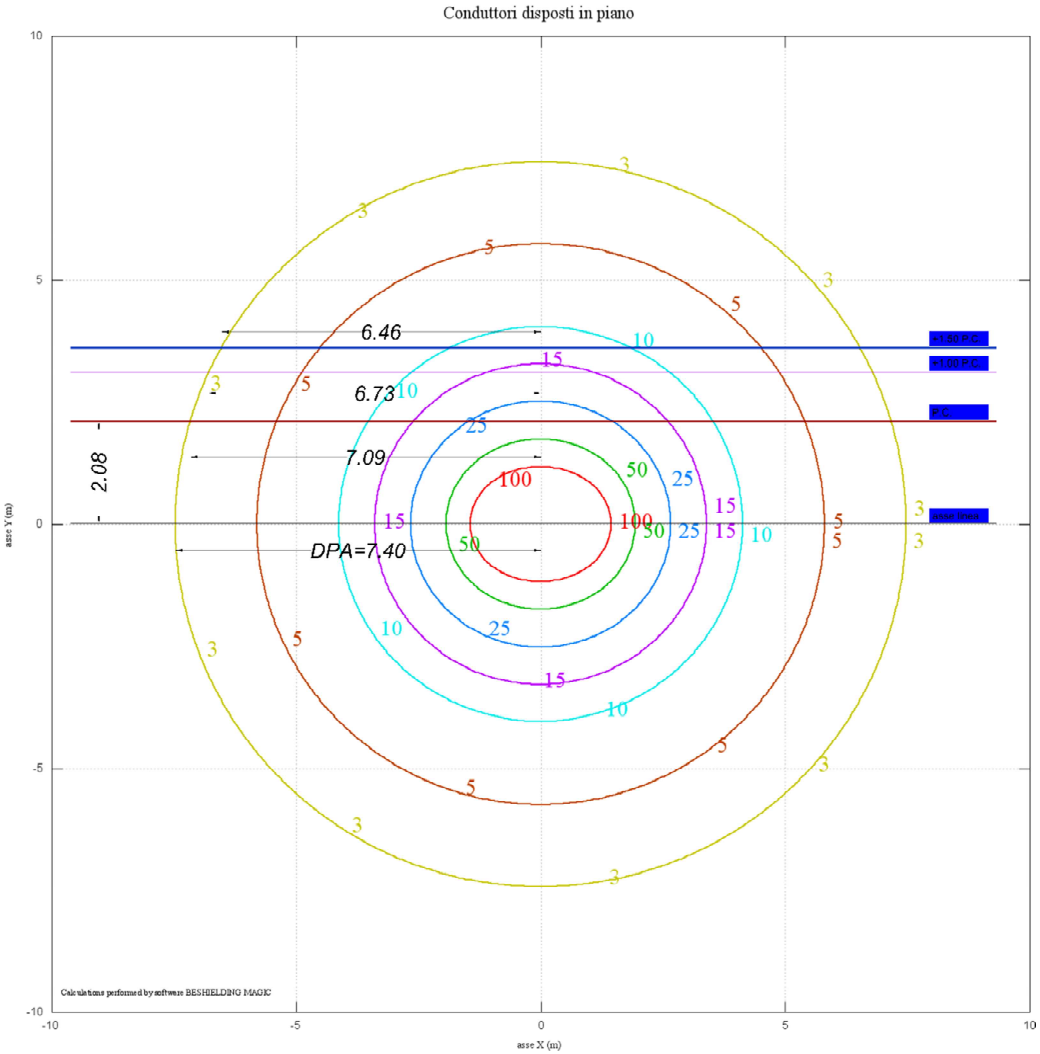




4.01 m
(raggio del cilindroide)
Ovvero DPA

Disposizione esemplificativa di una singola terna in corrispondenza di una buca giunti

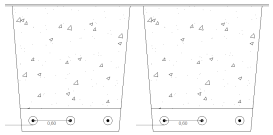
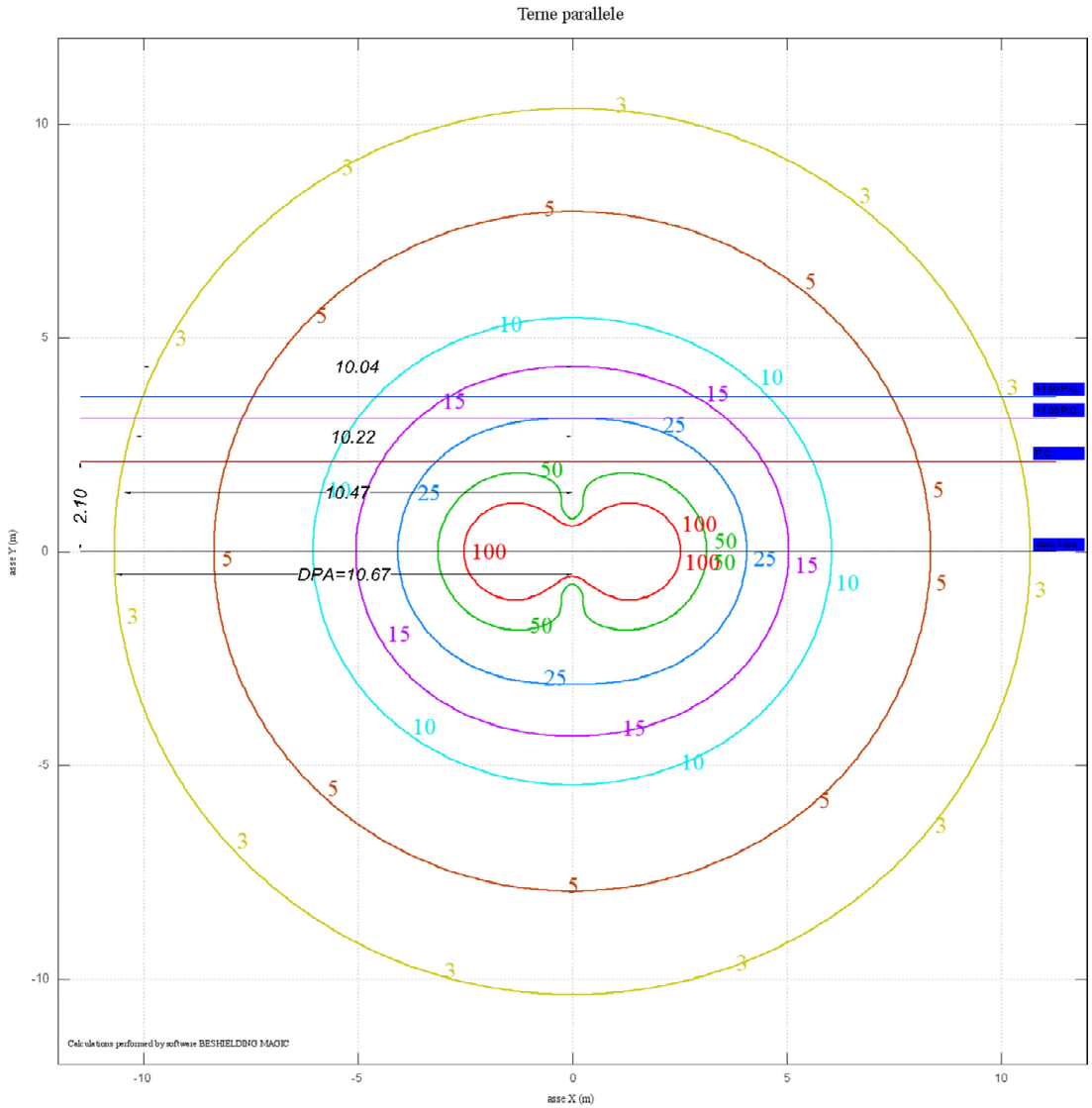


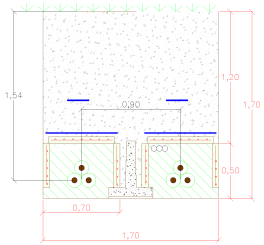
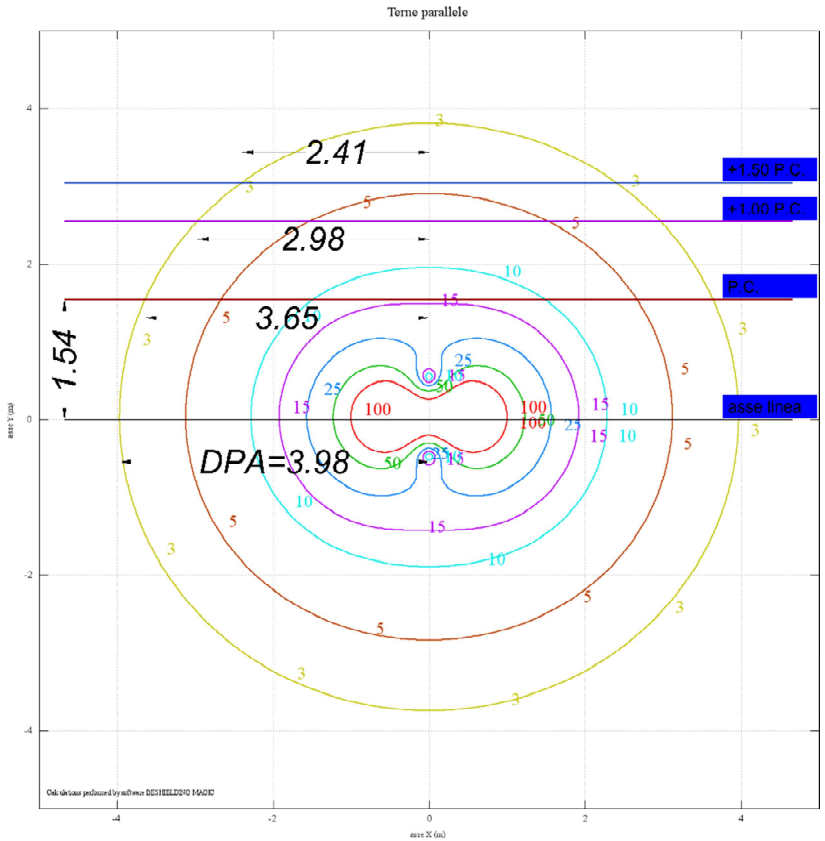


7.40 m

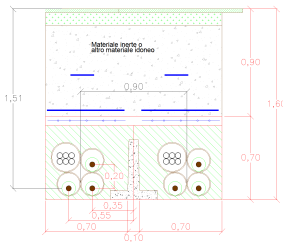
(raggio del cilindroide)

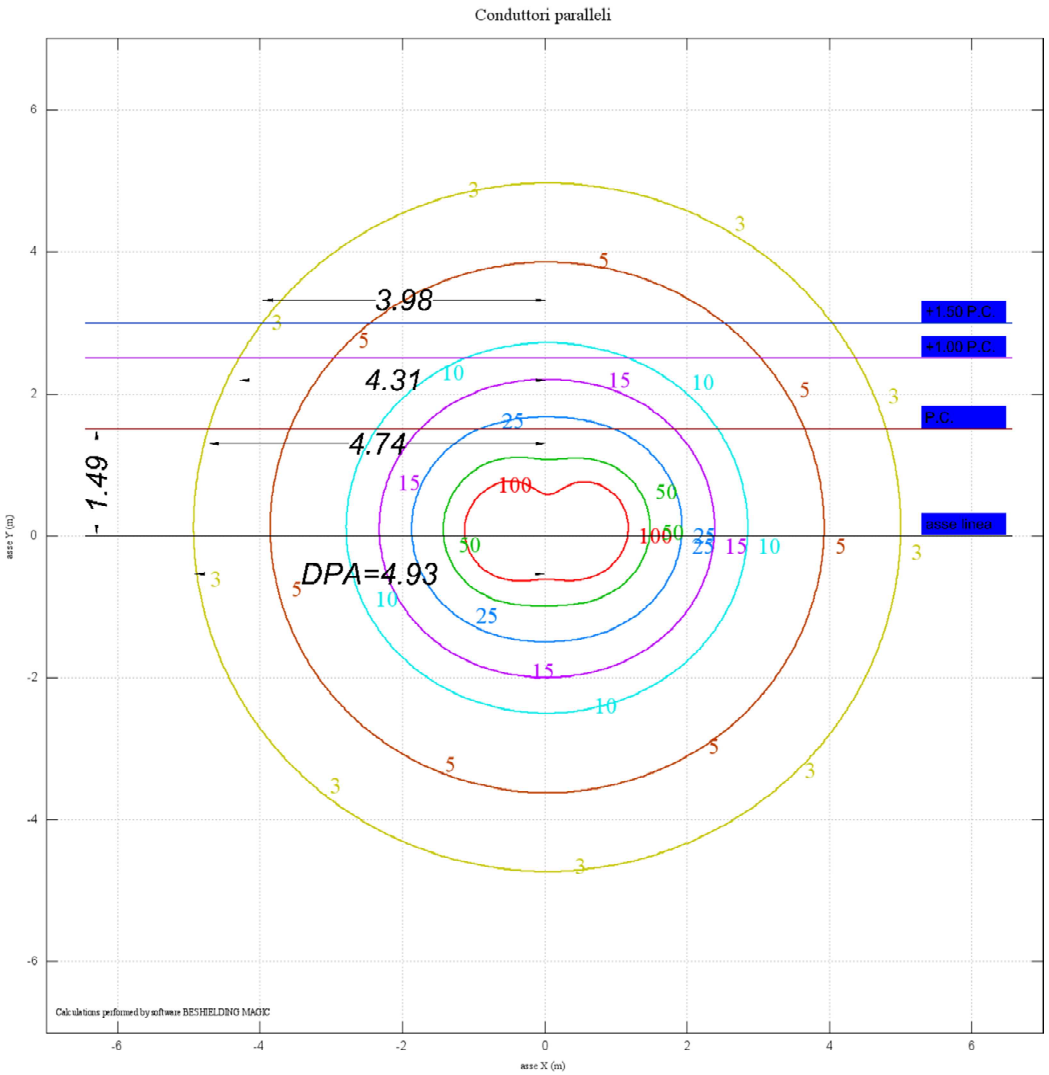
Ovvero DPA

Disposizione esemplificativa di una DOPPIA terna in corrispondenza di una buca giunti			**10.67 m** ***(raggio del cilindroide)*** ***Ovvero DPA***

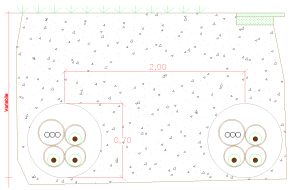
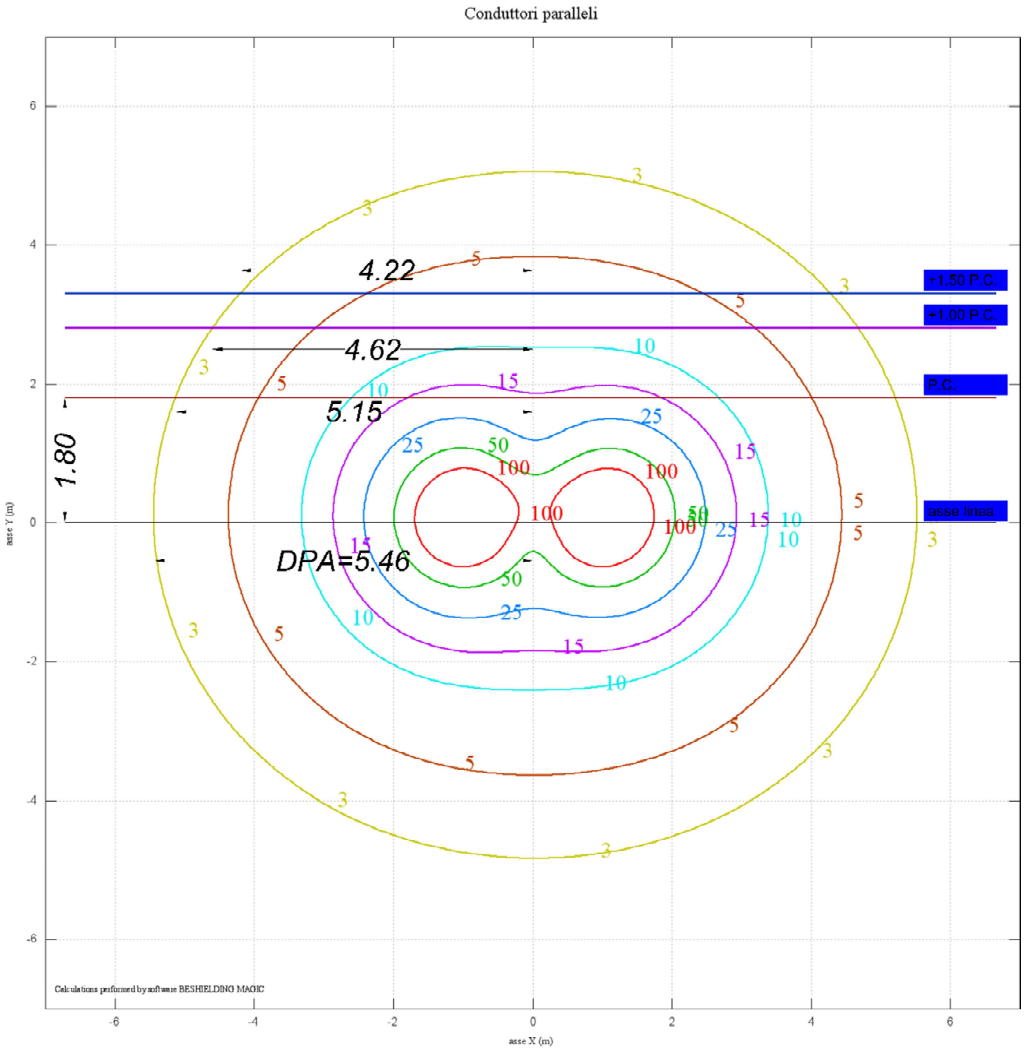
Elettrodotto in cavo DT con posa a trifoglio			**3.98 m** *(raggio del cilindroide)* *Ovvero DPA*

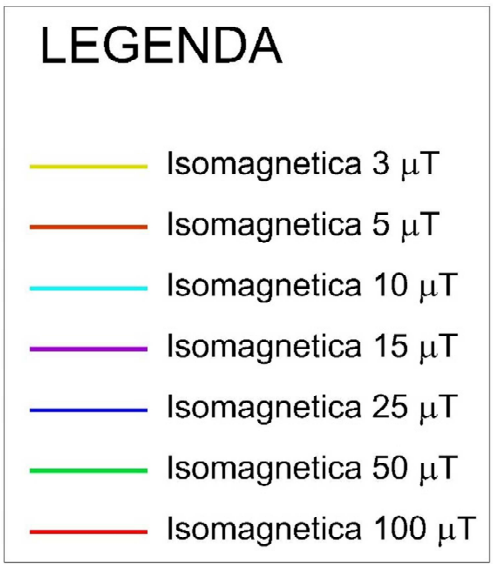
Elettrodotto in cavo DT con posa in tubiera i=0.80 m





4.93 m
(raggio del cilindroide)
Ovvero DPA

Elettrodotto in cavo DT con posa in T.O.C.-i=2 m			**5.46 m** *(raggio del cilindroide)* *Ovvero DPA*



I risultati ottenuti illustrano come nel primo caso, per singola terna si opera in sicurezza se si assume una DPA di 5 m per lato rispetto all'asse dell'elettrodotto e nel secondo caso, ipotizzando le due terne contemporaneamente in funzione, si opera in sicurezza se si assume una DPA di 6 m per lato rispetto all'asse dell'elettrodotto.

Nel caso di specie, per il calcolo dei campi elettromagnetici, si sono considerate le due linee sia con energizzazione singola terna che con energizzazione delle due terne. Dallo schema grafico riportato sugli elaborati grafici si assume il valore massimo delle due terne in esercizio per assolute ragioni di sicurezza.

Fatte queste valutazioni, si è ritenuto opportuno considerare una DPA che assume i valori massimi nella eventualità che le due terne di cavi siano entrambe in esercizio e senza schermatura, pertanto la DPA riportata sugli elaborati grafici sarà di 5 m per lato rispetto all'asse dell'elettrodotto ST, 6 m per lato rispetto all'asse dell'elettrodotto DT . Per quanto concerne le buche giunti la DPA assunta è pari a m 8.00 per lato rispetto all'asse dell'elettrodotto ST, 11 m per lato rispetto all'asse dell'elettrodotto DT, in quest'ultimo caso è stato ipotizzato anche l'eventualità che potessero essere realizzate due buche giunti affiancate.

Tale caso è ipotetico in quanto il progetto non prevede la realizzazione delle BG affiancate. In ogni caso bisogna tener conto che l'elettrodotto, se pur in doppia terna di cavi, uno sarà solo di backup. Per rimanere nei parametri della sicurezza, le verifiche su riportate sono state effettuate anche in considerazione che le due terne di cavi siano entrambi in esercizio. Gli elaborati grafici riportano gli schemi peggiorativi con l'elettrodotto privo di schermatura a vantaggio della sicurezza.

Vale la pena osservare che l'individuazione delle buche giunti potrà però dirsi definitiva solo in fase di **progettazione esecutiva** a seguito di specifiche prove di ispezione del sottosuolo per valutarne l'idoneità al posizionamento. Pertanto, qualora nella progettazione esecutiva ci dovessero essere delle variazioni al tracciato e/o alla dislocazione delle buche giunti, verrà effettuata una nuova valutazione delle fasce di rispetto. Sin da ora però è possibile dire che qualunque sarà la collocazione delle buche giunti e del tracciato a seguito del progetto esecutivo, l'impiego delle canalette schermanti o dei loop passivi di fattore di attenuazione opportuno consentirà il rispetto ovunque dell'obiettivo di qualità di 3 μT.

La fascia di rispetto/DPA relativa alla posa in pano allargata (tipica delle buche giunti) sarà estesa per ± 25 metri rispetto alla posizione ipotizzata in sede di redazione del PTO.

Qualora il progetto esecutivo/esecuzione (as built) comporti variazioni sostanziali al tracciato o alla dislocazione delle buche giunti, sarà cura del committente rielaborare e ripresentare presso gli enti preposti la nuova valutazione dei campi elettromagnetici.

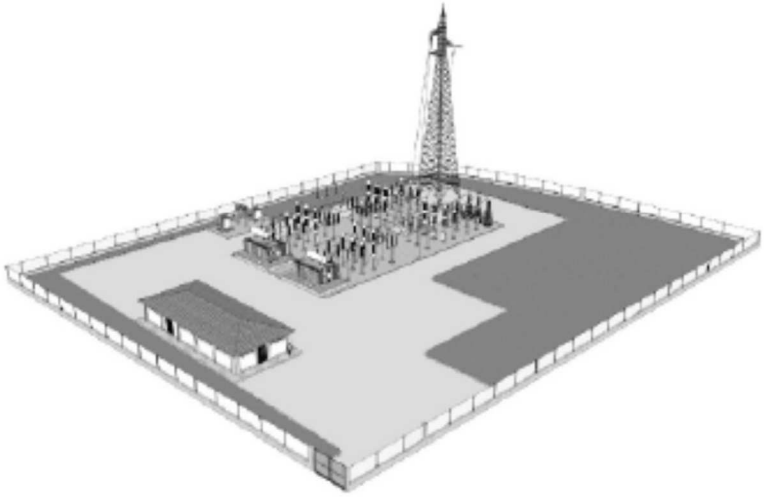
Il posizionamento della fascia di rispetto è riportato nella seguente documentazione allegata:

- Planimetria Catastale con DPA
- CTR con DPA
- Ortofoto con DPA

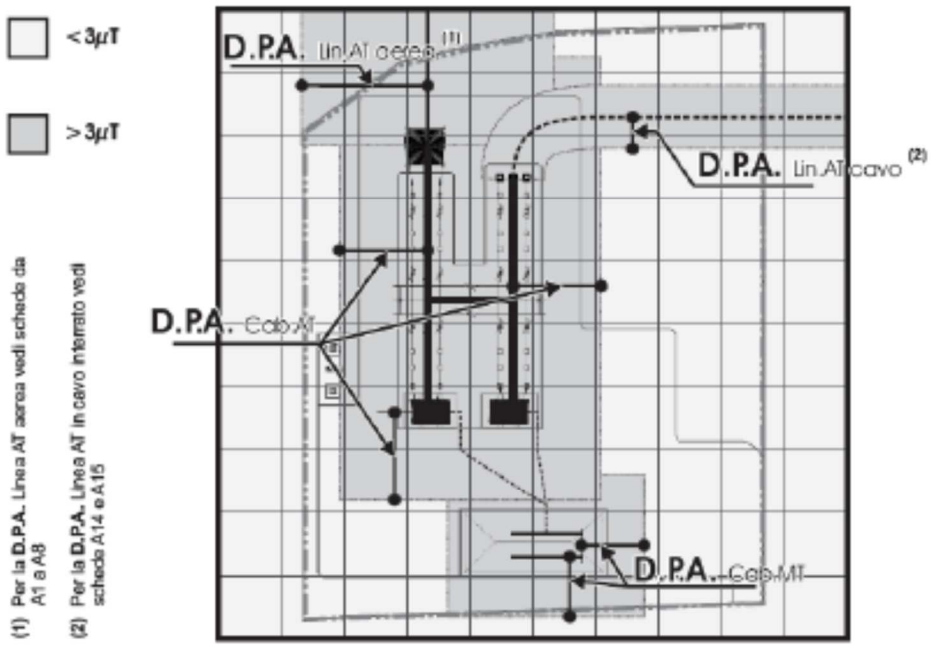
6.3.2 Calcolo delle fasce di rispetto per la Cabina Primaria

Ai fini della determinazione del campo elettromagnetico generato si assume come base di riferimento lo studio condotto da E_Distribuzione vedi tabella A16. Lo studio condotto da E_Distribuzione con il software EMF Tools V. 3.0 del CESI e con modellizzazione delle sorgenti congruente con le linee guida della CEI211-4 ha dato il risultato esposto in tabella A16 con una DPA dal centro sbarre della C.P. di 14,00 mt. Lo studio condotto da E_Distribuzione ha, alla base del calcolo n° 2 trasformatori da 63 MVA eserciti in parallelo ed in sovraccarico del 50% con corrente circolante sulle sbarre di 870 A.

A16 - Cabina primaria isolata in aria (132/150-15/20 kV)



RAPPRESENTAZIONE DELLA FASCIA DI RISPETTO E DELLA D.P.A.



Tipologia trasformatore [MVA]	CABINA PRIMARIA						
	D.P.A. Cab. da centro sbarre AT	Distanza tra le fasi AT	Corrente	D.P.A. Cab. da centro sbarre MT	Distanza tra le fasi MT	Corrente	Riferimento
	m	m	A	m	m	A	
63	**14**	2.20	870	**7**	0.38	2332	*A16*

6.3.3 Verifica numerica delle fasce di rispetto per la C.P. in oggetto

Il valore del campo magnetico generato dalla C.P. e la rispettiva fascia di rispetto è stato ottenuto utilizzando il programma "*MAGIC® – Magnetic Induction Calculation*" sviluppato da *BEShielding S.r.l.* in aderenza alla norma CEI 211-4 ed in conformità a quanto disposto dal DPCM 08/07/03.

I calcoli sono stati condotti nelle seguenti due condizioni di esercizio:

- Entrambe le terne sono attive e alla massima intensità di corrente I_{max}=800 A a cui corrisponde una potenza nominale di 183 MVA per singola terna;

Essendo la potenza apparente data da $S = \sqrt{3} \times V_L \times I_L$

Con

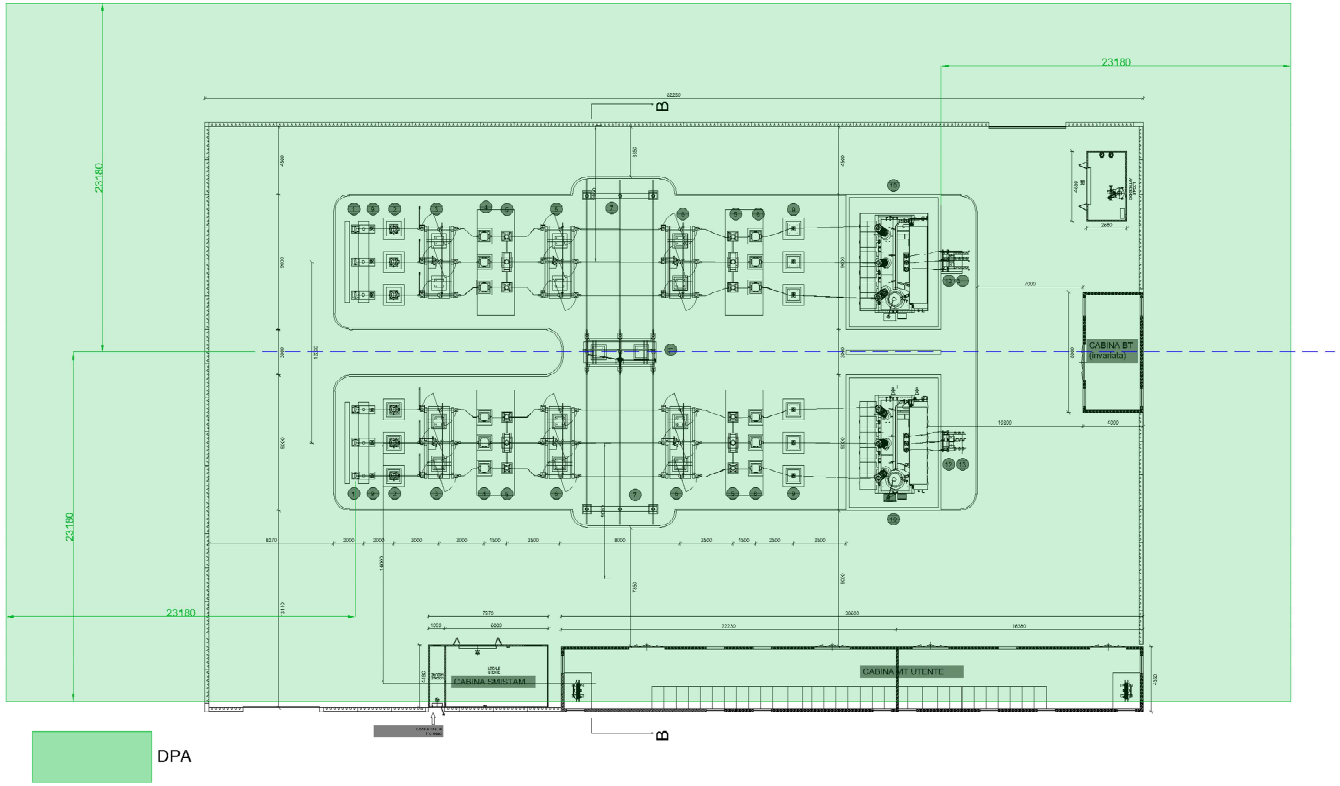
S: Potenza apparente (VA)

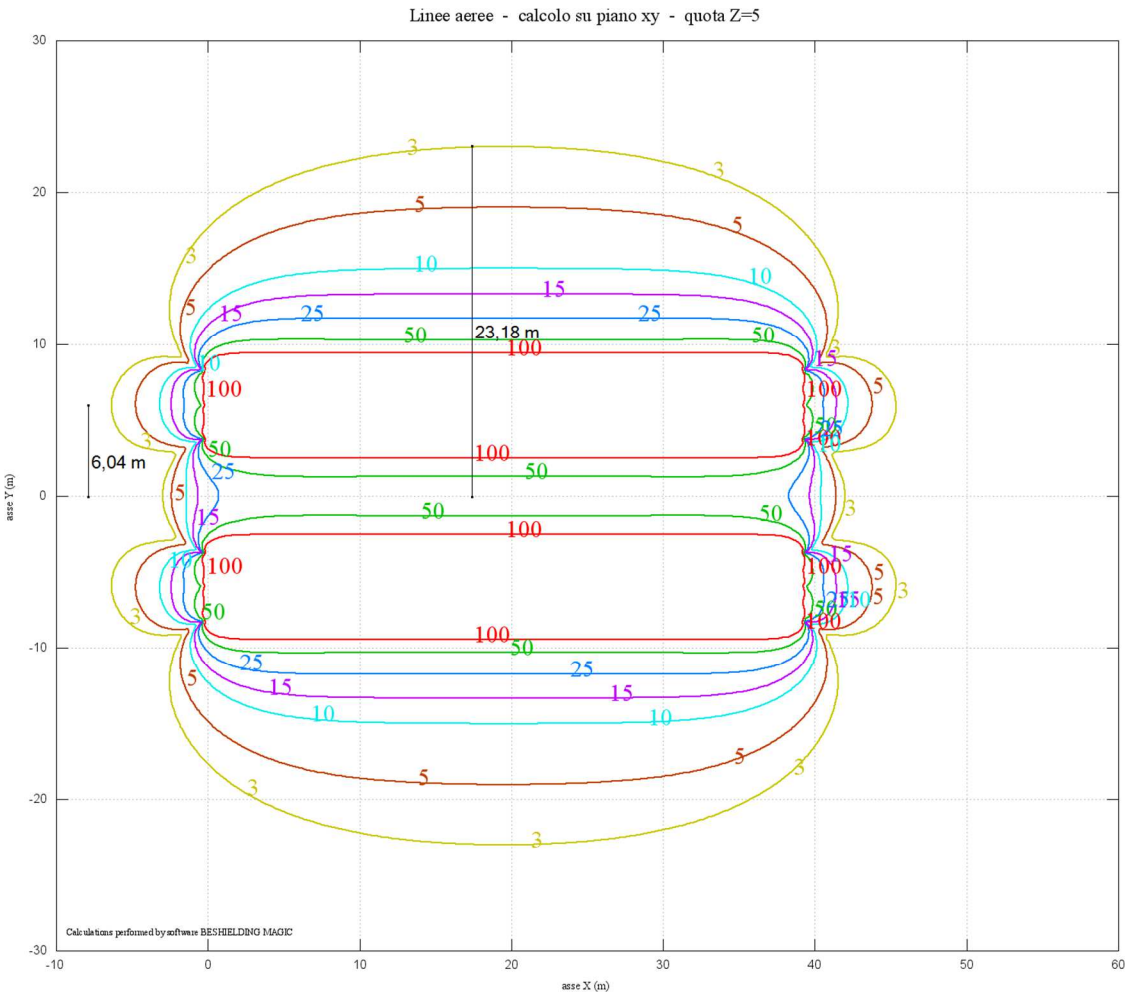
V_L: Tensione concatenata (V)

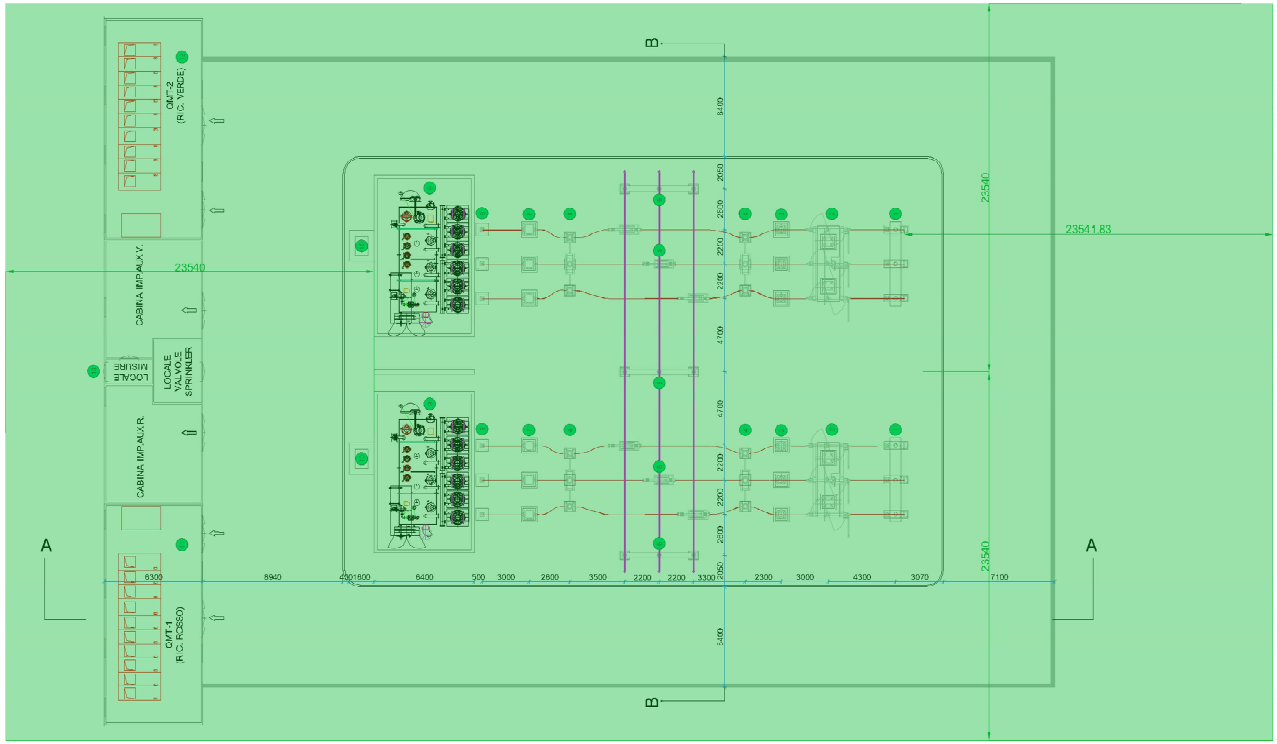
I_L: Corrente di linea.(A)

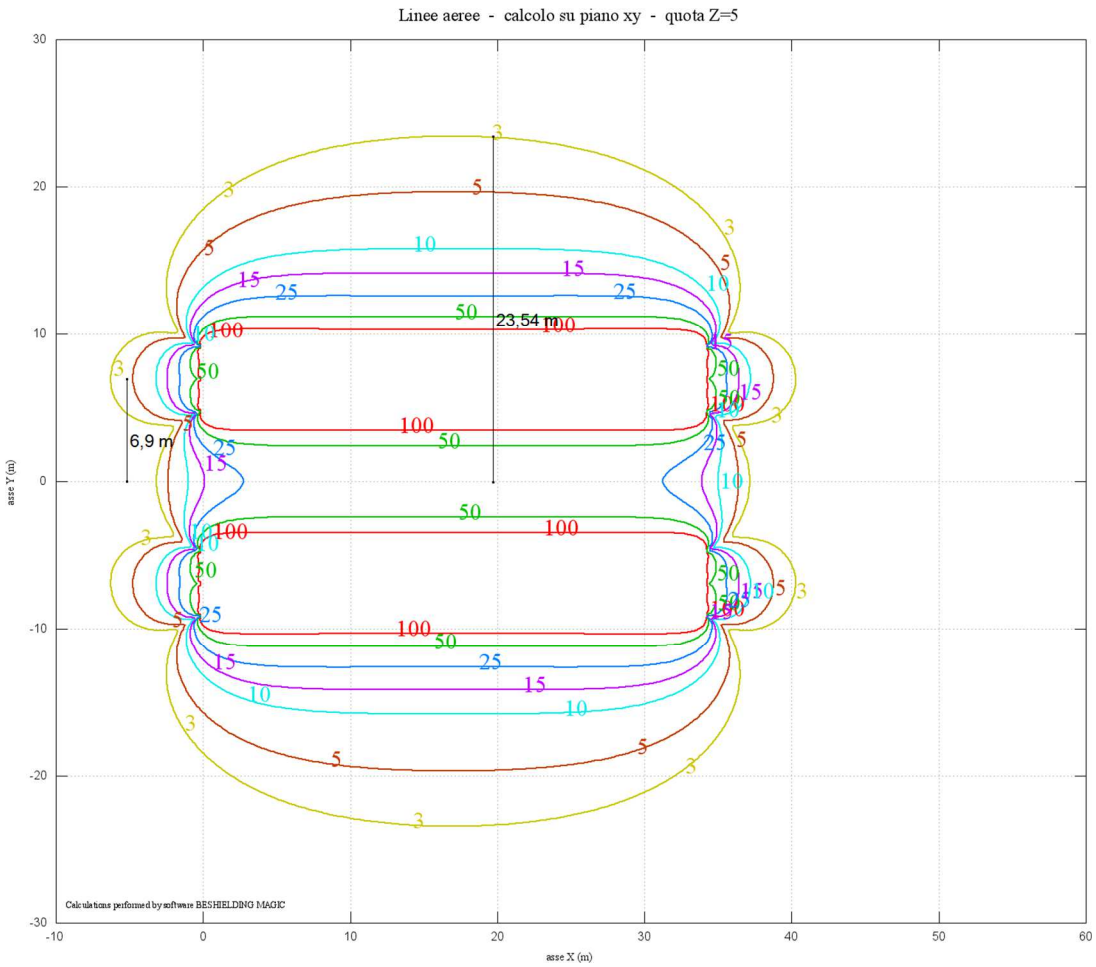
Si ha:

ΔV	I	**P**
V	A	**MVA**
132000	800	**183**

DISPOSIZIONE ESEMPLIFICATIVA **VALORE CAMPO INDUZIONE MAGNETICA della C.P. MIL01**	**VALORE FASCIA RISPETTO [m]**
	$DPA = 23.18\ m$


Linee aeree - calcolo su piano xy - quota Z=5
23,18 m
6,04 m
asse Y (m)
asse X (m)
Calculations performed by software BESHIELDING MAGIC

DISPOSIZIONE ESEMPLIFICATIVA **VALORE CAMPO INDUZIONE MAGNETICA della C.P. MIL08**	**VALORE FASCIA RISPETTO [m]**
 DPA	$DPA = 23.54\ m$


Linee aeree - calcolo su piano xy - quota Z=5
23,54 m
6,9 m
asse Y (m)
asse X (m)
Calculations performed by software BESHIELDING MAGIC

7 INDIVIDUAZIONE ED ANALISI DELLE STRUTTURE INTERESSATE

7.1 Dati utilizzati per l'individuazione e l'analisi

L'individuazione ed analisi delle strutture interessate, così come riportato nel paragrafo metodologico, è stata effettuata all'interno della proiezione al suolo della fascia di rispetto.

Per lo svolgimento dell'attività si è fatto riferimento a tutte le informazioni disponibili:

1. Carta Tecnica Regionale ufficiale
2. Planimetrie catastali aggiornate a febbraio 2025
3. Ortofoto
4. Ricognizione ulteriore sul campo condotta nel ottobre 2024

Queste informazioni hanno consentito di avere una individuazione fedele, univoca e di dettaglio delle strutture presenti sul territorio.

Si vuole evidenziare che le informazioni di tipo catastale sono utilizzate solo per classificare le strutture e non per desumerne dati tecnici e/o geometrici. Infatti l'oramai nota mancanza di aggiornamento del sistema del Catasto non è attendibile né per la forma delle strutture e né per la loro collocazione geografica.

*Con riferimento alla tavola **SIL8-PT-AT-DPA-02_03_Planimetria Catastale con DPA**, la fascia DPA sembrerebbe interessare il fabbricato nella particella 884 del foglio n.01 del comune di Siziano. Tuttavia, atteso che nelle procedure di censimento dei fabbricati è ammesso l'adattamento, i fogli del N.C.T. non possono essere probatori in relazione all'esatta posizione dei fabbricati che risulta, pertanto, corretta solo sulle tavole con ortofoto e CTR, dalle quali si può evincere che la fascia DPA è esterna al recettore in questione.*

7.2 Individuazione delle strutture potenzialmente interessate

Dopo aver individuato la proiezione della fascia di rispetto si è proceduto alla individuazione delle **strutture interessate** che ricadono al suo interno, ricorrendo alle informazioni desunte come descritto nel paragrafo precedente,

Le strutture ricadenti nella fascia di rispetto sono state classificate nel modo seguente:

- ***Strutture categoria 1***: strutture presenti sulla planimetria catastale e/o CTR ma che non risultano presenti da sopralluoghi in sito;
- ***Strutture categoria 2:*** strutture presenti, individuate con ricorso a tutte le informazioni disponibili di cui al paragrafo 6.1 che non sono classificabili come "luoghi adibiti a permanenze non inferiori a quattro ore giornaliere" dal momento che ricorrono contemporaneamente le seguenti condizioni:

- fabbricati non sono residenziali, ma sono classificati come “fabbricati rurali”;
- depositi agricoli, ruderi, etc
- Fabbricati o ruderi in stato di abbandono e/o uno stato di totale inabitabilità degli stessi.

- ***Strutture categoria 3:*** strutture presenti sulla planimetria che possono essere classificabili come “luoghi adibiti a permanenze non inferiori alle quattro ore giornaliere”

Vale la pena evidenziare che tutte le strutture quali "ruderi", "baracche", "tettoie", "deposito attrezzi", "deposito agricoli", non possono essere considerate in alcun modo recettori sensibili dal momento che per le loro caratteristiche non hanno le condizioni di abitabilità o che consentono la permanenza di persone per un tempo superiore alle 4 ore giornaliere.

Inoltre con particolare riferimento ai **"ruderi"**, se pure si volesse procedere ad una ristrutturazione per renderlo agibile, tale opera richiederebbe il rilascio di un titolo edilizio (SCIA, Permesso di Costruire o alto atto) da parte dell'Ufficio tecnico del Comune in cui ricade la struttura. Il titolo autorizzativo per la ristrutturazione del rudere risulterebbe non rilasciabile per le seguenti motivazioni:

- durante l'iter di autorizzazione degli elettrodotti sono vigenti le misure di salvaguardia emanate con l'Avvio del Procedimento Autorizzativo.

Le strutture potenzialmente sensibili sono riportate su due differenti tipologie di elaborati in modo da poterne evidenziare i differenti aspetti. In particolare si è provveduto a riportare le informazioni su carta tecnica regionale e su planimetria catastale, come mostrato nei documenti sotto indicati:

- Su planimetria catastale in scala 1:2000
- Su CTR in scala 1:5000

Dai sopralluoghi effettuati i recettori individuati sono tutti al di fuori della fascia di rispetto dei 3 μT.

8 CONCLUSIONI

In conclusione il tracciato dell’elettrodotto in cavo è stato studiato in modo da non interferire con strutture classificabili come recettori potenzialmente sensibili ovvero il valore del **campo di induzione magnetica** è sempre inferiore a 3 μT in corrispondenza dei punti di interesse (abitazioni, aree in cui si prevede una permanenza di persone per più di 4 ore nella giornata).

Si può concludere che, la fascia DPA dell’elettrodotto e della Cabina Primaria oggetto della presente relazione in nessun caso interferisce con recettori sensibili.

DICHIARAZIONE

DICHIARAZIONE DI ASSEVERAMENTO

(ai sensi dell'art. 1 sexies, comma 4-octies del D.Lgs 29/08/2003 n.239, convertito in Legge 27/10/2003 n.290 e ss.mm.ii.)

ELETTRODOTTO / CABINA PRIMARIA

ELETTRODOTTO AT 132 kV IN CAVO INTERRATO
-SE-TERNA-LACCHIARELLA - C.P. INFRASTRUCTURE ITALIA LAND 2 S.R.L DI SIZIANO (PV)
-C.P. INFRASTRUCTURE ITALIA LAND 2 S.R.L DI SIZIANO (PV)-C.P. INFRASTRUCTURE ITALIA LAND 1 S.R.L DI SIZIANO (PV)
-REALIZZAZIONE C.P. INFRASTRUCTURE ITALIA LAND 2 S.R.L DI SIZIANO (PV)

Il sottoscritto Ing. CALABRESE NICOLA, FERNANDO, GIUSEPPE , C.F. CLBNLF75A06G793L , nato il 06/01/1975 a POLLA (SA) iscritto all'ordine degli ingegneri della provincia di POTENZA al n. 2400 sez. A, domiciliato per la carica in SAN SEVERINO LUCANO via S. VINCENZO n. 35, CAP 85030 Prov. PZ, in qualità di tecnico della progettazione

DICHIARA

Sotto la propria responsabilità:

- che i lavori da eseguire consistono in:

  ELETTRODOTTO AT 132 kV IN CAVO INTERRATO
  -SE-TERNA-LACCHIARELLA - C.P. INFRASTRUCTURE ITALIA LAND 2 S.R.L DI SIZIANO (PV)
  -C.P. INFRASTRUCTURE ITALIA LAND 2 S.R.L DI SIZIANO (PV)-C.P. INFRASTRUCTURE ITALIA LAND 1 S.R.L DI SIZIANO (PV)
  -REALIZZAZIONE C.P. INFRASTRUCTURE ITALIA LAND 2 S.R.L DI SIZIANO (PV)

- il valore del campo di induzione magnetica, in corrispondenza dei punti di interesse (abitazioni, aree in cui si prevede una permanenza di persone per più di 4 ore nella giornata) è sempre inferiore a 3 μT;

il valore del campo elettrico, in corrispondenza dei punti di interesse (abitazioni, aree in cui si prevede una permanenza di persone per più di 4 ore nella giornata) nel rispetto dell'obiettivo di qualità dettato dal DPCM dell'8 luglio 2003 è sempre inferiore a 5 kV/m;

ASSEVERA

Il rispetto della normativa in materia di elettromagnetismo e di progettazione, costruzione ed esercizio delle linee elettriche e delle norme tecniche per le costruzioni, il tutto secondo quando illustrato nella documentazione tecnica ivi allegata.

Il Progettista asseverante

Ing. Nicola, F.,G. Calabrese

ORDINE DEGLI INGEGNERI PROV. POTENZA - DOTT. ING. CALABRESE NICOLA FERNANDO - N° 2400 SET. a-b-c

Luogo San Severino lucano ., data20/06/2026

APPENDICE A – Schermature-

1 Schermature – Canalette o Loop passivi-

1.1 Premessa

Nella fase di redazione del **P**iano **T**ecnico delle **O**pere la valutazione dei campi *elettromagnetici ha lo scopo di eseguire una stima **cautelativa*** dello spazio circostante un elettrodotto, che comprende tutti i punti,al di sopra e al di sotto del livello del suolo, caratterizzati da un'induzione magnetica di intensità maggiore o uguale all'obiettivo di qualità (3 μT), e non la valutazione dei CEM in esercizio, perché questa (i CEM) possono essere valutati con esattezza solo a seguito di progettazione esecutiva.
Lo sviluppo del tracciato ipotizzato non richiede, secondo le valutazioni effettuate in questa fase, l'impiego di schermi che consentano di diminuire il valore del campo di induzione magnetica e, quindi, il volume della fascia di rispetto in prossimità di zone sensibili. Tuttavia, qualora in fase esecutiva i CEM dovessero invadere un area al di fuori delle fasce di rispetto / DPA valutate in questa fase, è possibile precedere alla tecnica delle schermature al fine di rispettare i limiti delle fasce di rispetto e si provvederà al dimensionamento di concerto con il costruttore dei cavi.
Di seguito vengono illustrate le tecniche di posa con schermatura comunemente utilizzate:

1.2 Caratteristiche tecniche

La tecnica di posa con schermatura può essere realizzata in più modi, i più comuni consistono :

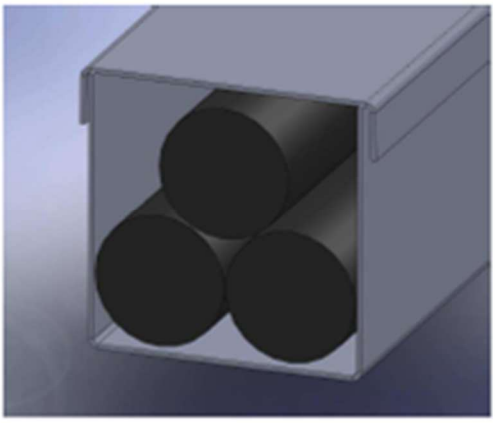
- Uso di canalette di materiale ferromagnetico riempite con cemento a resistività termica stabilizzata.
- Utilizzo di Loop passivi, consistenti in cavi elettrici appositamente dimensionati posti ai bordi del cavidotto.

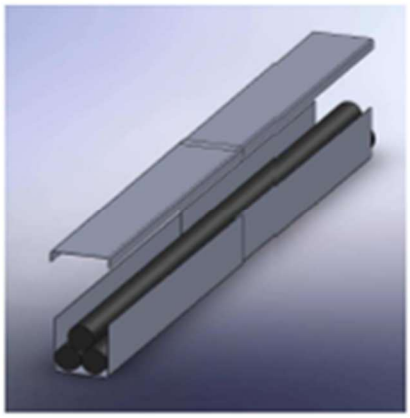
Le canalette o i Loop passivi vengono utilizzati nei tratti di elettrodotto caratterizzati dalla vicinanza a strutture interessate in corrispondenza delle quali si ha la necessità di ridurre i valori assunti dal campo magnetico.
L'impiego delle canalette schermanti o dei Loop passivi con fattore di attenuazione opportuno consente di diminuire il valore del campo di induzione magnetica e quindi il volume della fascia di rispetto a valori estremamente ridotti.
Il dimensionamento della schermatura sarà effettuato in sede di progetto esecutivo, data anche la stretta correlazione con le competenze del costruttore dei cavi.

1.3 Canalette

Le canalette sono costituite da unità a pianta trapezoidale sequenziabili a realizzare percorsi comunque complessi, anche non lineari e non planari, in configurazione chiusa specifica per interramento, con protezione dalla corrosione tramite un ciclo di verniciatura a polvere epossidica in grado di garantire un'ottima resistenza alla corrosione anche in ambienti aggressivi.
Le canalette hanno dimensioni variabili in funzione del diametro dei cavi.

Le giunzioni sono studiate in modo che la sfruttabilità dei giochi e l'elasticità relativa degli elementi permettano di adeguare la canaletta al tracciato di posa della linea.



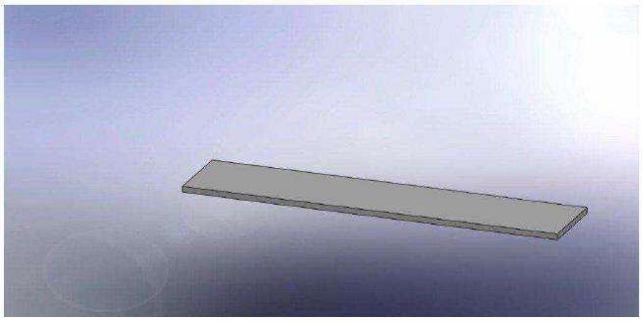


Il coperchio viene bloccato con morsetti di fissaggio per garantire il contatto tra scafo e coperchio.

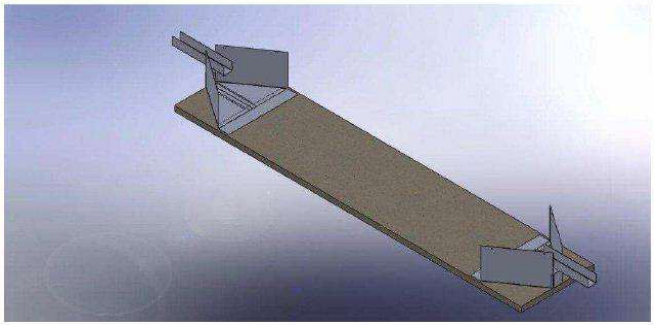
Diversa è invece la geometria degli elementi costituenti la canaletta nel caso di schermatura dei tratti in corrispondenza delle buche giunti: in questo caso il manufatto è realizzato mediante l'utilizzo di due elementi ad imbuto, da una base modulare da porre in opera prima della realizzazione dei giunti e da un coperchio anch'esso modulare posato con semplice appoggio guidato sui bordi.

Di seguito si riportano le fasi di installazione dei suddetti elementi:

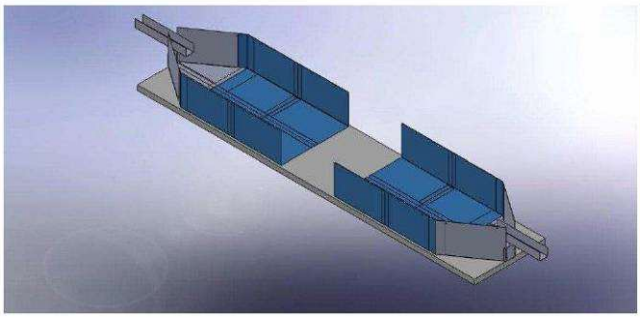
FASE 1 (realizzazione di una platea in cemento)



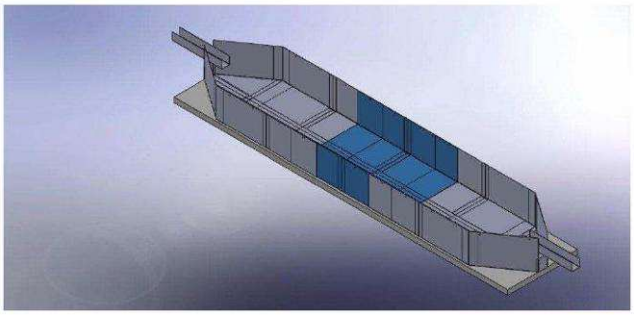
FASE 2 (posa basi imbuti)



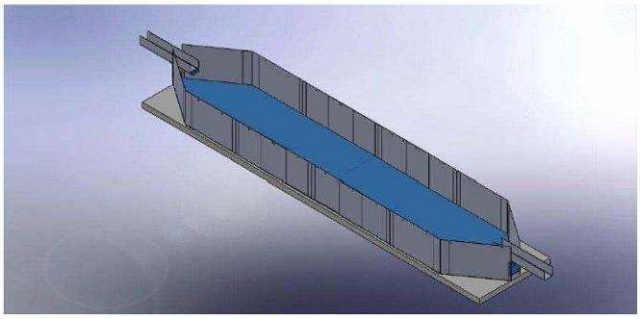
FASE 3 (posa basi modulari)



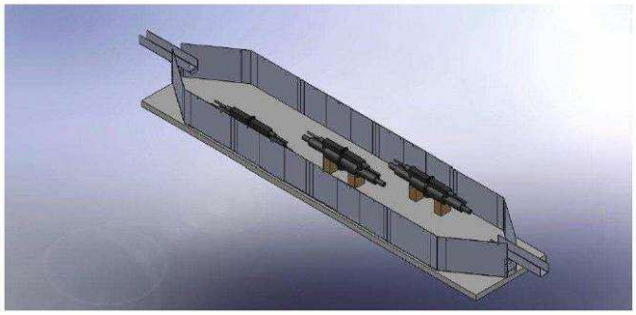
FASE 4 (completamento base)



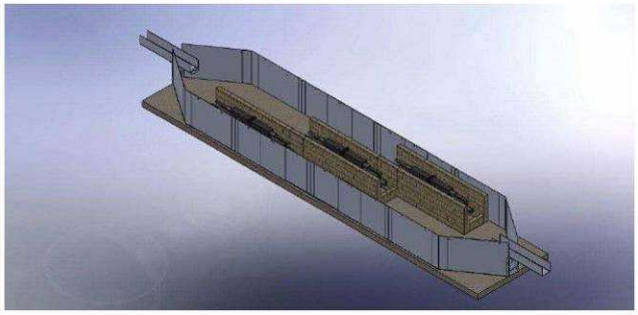
FASE 5 (getto platea interna)



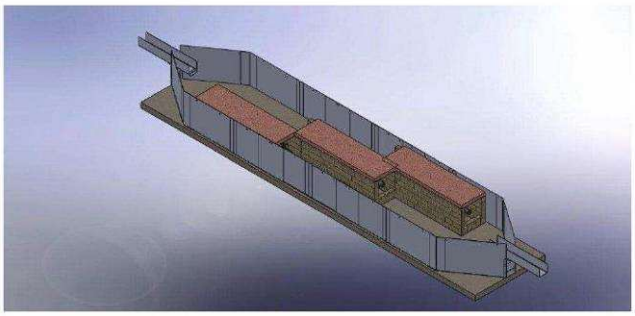
FASE 6 (realizzazione giunti)



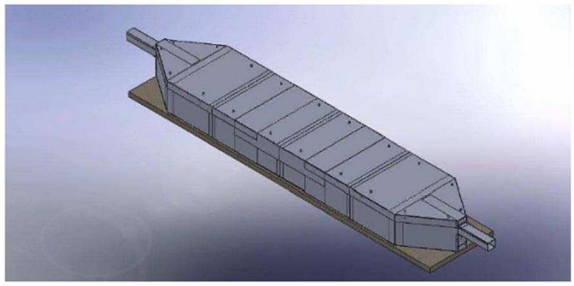
FASE 7 (realizzazione muretti)



FASE 8 (realizzazione coperchi muretti)



FASE 9 (posa coperchi a completamento buca)



1.4 Capacità schermante delle canalette

La SELITE, azienda leader nel settore delle schermature di campi magnetici a frequenza industriale, produttrice di canalette omologate nel 2009 da Terna in accordo alle loro prescrizioni tecniche, ha eseguito, mediante il software dedicato FC400, studi teorici sulla capacità schermante delle canalette relativamente a cavi aventi le medesime caratteristiche, elettriche e di posa, di quelle dei cavi utilizzati per la realizzazione degli elettrodotti in cavo oggetto della seguente relazione, che dimostrano che è possibile ottenere valori di capacità schermante che vanno da un minimo di **18 dB** ad un massimo di **40 dB** a seconda della composizione e del dimensionamento delle stesse canalette e, per i tratti in corrispondenza delle **buche giunti**, valori di capacità schermante che vanno da un minimo di **26 dB** ad un massimo di **35 dB**.
In particolare, essendo il valore di capacità schermante (SE) pari a:

$$SE = 20 * \log (H1/H2)$$

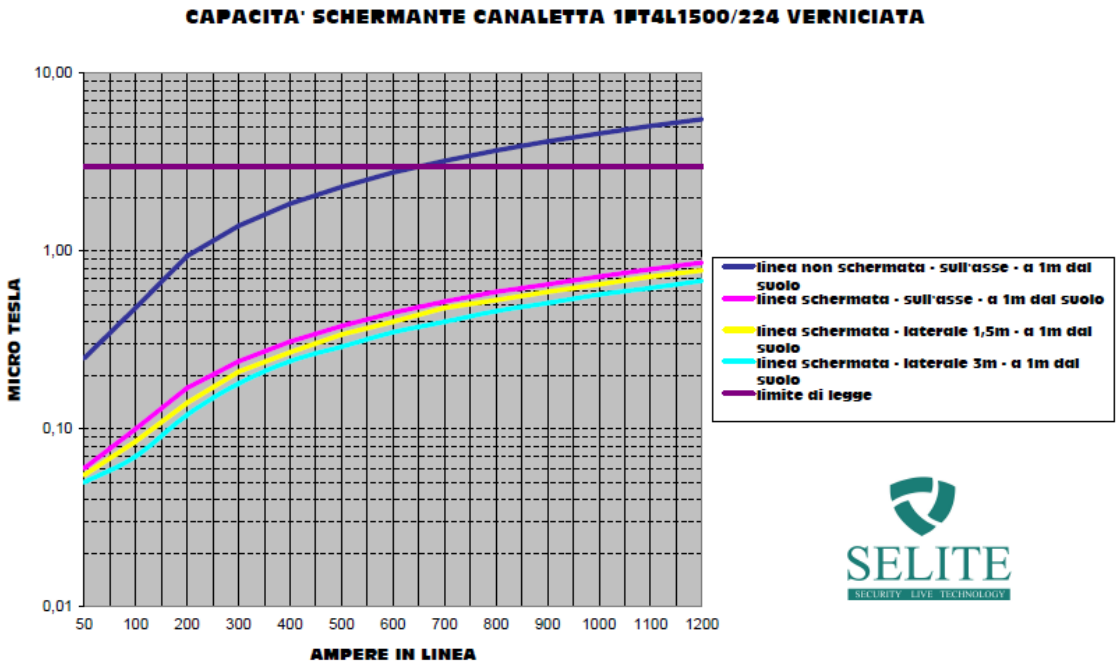
(H1 e H2 sono rispettivamente i valori del campo magnetico senza e con l'interposizione dello schermo)

si può notare come

- in corrispondenza del valore minimo di capacità schermante ottenibile (**18dB**) si abbia un'attenuazione del campo magnetico pari a 7,9. Ovvero il campo magnetico con l'utilizzo della schermatura viene attenuato di ben 7,9 volte rispetto a quello generato dal cavo senza l'utilizzo di schermatura.
- per i tratti in corrispondenza delle buche giunti, in corrispondenza del valore minimo di capacità schermante ottenibile (**26dB**) si abbia un'attenuazione del campo magnetico pari a 19,95. Ovvero il campo magnetico con l'utilizzo della schermatura viene attenuato di ben 19,95 volte rispetto a quello generato dal cavo senza l'utilizzo di schermatura.

È dimostrato come l'impiego degli schermi consenta il rispetto del limite di qualità di 3 µT, imposto dal D.P.C.M. dell'8 luglio 2003, in tutte le configurazioni di posa dei cavi e delle buche giunti, scegliendo opportunamente la tipologia di schermo.

I su citati studi teorici sono stati inoltre supportati da misure sperimentali e prove di laboratorio. A titolo di esempio si riporta il grafico relativo agli andamenti sperimentali del campo magnetico ad un metro dal suolo prodotto da una linea ad AT in cavo interrato, nella posa a trifoglio, alla profondità di 1,5m. Le curve rappresentano il campo magnetico senza canaletta e con canaletta schermante del tipo 1FT4 in tre diverse posizioni: sull'asse della linea, a 1,5 e 3 m lateralmente all'asse linea.



1.5 Loop Passivi

Altro sitema ultilizzato è la schermatura mediante l'impiego di anelli con cavi passivi, che si basa sulla considerazione fisica secondo la quale in un anello chiuso di elemeneti conduttori, disposti in prossimità di un circuito (trifase) in cui circola corrente alternata, si genera una corrente, anch'essa alternata, che produce un flusso magnetico che si oppone a quello che lo ha generato e dunque può essere utilizzato per schermare il campo magnetico; se la geometria con cui viene disposto il circuito passivo è opportuna, si riesce a ridurre il campo magnetico nella zona d'interesse.

Il circuito passivo deve essere vicino al circuito da schermare, e lontano dalla zona che deve essere schermata, dunque saranno disposti all'interno della trincea di posa del cavo.

Occorre evidenziare che nella schermatura ad anelli, i cavi passivi sono tutti cortocircuitati elle due estremità del tratto schermato, con l'utilizzo di una o più morsettiere per ciascuna estremità. In questo modo si ottiene un numero di anelli superiore rispetto a quello ottenuto con singoli anelli isolati tra loro.

Le stesse considerazioni descritte per una schermatura di una trincea possono ritenersi valide anche per quanto attiene la schermatura delle buche giunti.
Nelle figure riportate nei paragrafi successivi (calcolo fasce di rispetto) viene riportata la simulazione del caso in cui lungo il tracciato del cavo, siano istallati dei circuiti di mitigazione passiva per ridurre i valori del campo magnetico e riportarlo entro il limite imposto.

L'impiego delle canalette schermanti o dei loop passivi con fattore di attenuazione opportuno consente di diminuire il valore del campo di induzione magnetica e quindi il volume della fascia di rispetto a valori estremamente ridotti. Il dimensionamento della schermatura sarà effettuato in sede di progetto esecutivo, data anche la stretta correlazione con le competenze del costruttore dei cavi e la tipologia di posa da odottare.
È importante osservare che il posizionamento delle buche giunti potrà essere considerato definitivo solo a seguito della progettazione esecutiva, a seguito di specifiche prove di ispezione del sottosuolo necessarie per valutarne l'idoneità al posizionamento. Pertanto, qualora nella progettazione esecutiva ci dovessero essere delle variazioni al tracciato e/o alla dislocazione delle buche giunti, verrà effettuata una nuova valutazione della fascia di rispetto. Sin da ora però è possibile dire che qualunque sarà la collocazione delle buche giunti e del tracciato a seguito del progetto esecutivo, l'impiego delle canalette schermanti e/o di loop passivi con fattore di attenuazione opportuno consentirà in ogni caso il rispetto ovunque dell'obiettivo di qualità di 3 µT.

APPENDICE b – Validazione dei software impiegati-

Documento di Validazione

Algoritmi di calcolo del software MAGIC®
(**MAG**netic **I**nduction **C**alculation)

Revisione	Data	Elaborato	Approvato
06	29/06/2021	F.M.M.	S.G.
00 Emissione	07/01/2014	D.B.	M.M.

BESHIELDING

Sommario

1. Premessa 1
2. Verifica del modulo bidimensionale 2
   2.1. Confronto con CEI 211-04 2
   2.2. Confronto con codice CESI 2
3. Verifica del modulo tridimensionale 6
   3.1. Campo prodotto da un segmento finito arbitrariamente orientato 6
   3.2. Validazione sperimentale del modulo tridimensionale 7
4. Verifica del modulo tridimensionale:trasformatore di potenza 8
   4.1. Verifica del modello MAGIC® della singola colonna del trasformatore con modello FEM (Finite Element Method) 8
   4.2. Verifica del modello MAGIC® del trasformatore completo con misure sperimentali 10
5. Conclusioni 12

1. Premessa

Il presente documento riporta le verifiche funzionali del software MAGIC® attraverso il confronto con software già esistenti e di comprovata validità e con rilievi sperimentali.

Il confronto si sviluppa in tre parti:

1) verifica del modulo bidimensionale
2) verifica del modulo tridimensionale
3) verifica del modulo tridimensionale di configurazioni impiantistiche con particolare riferimento al trasformatore di potenza

Le principali caratteristiche del software MAGIC® sono:

a) software bi-tridimensionale
b) integrazione della formula di Biot-Savart
c) dominio infinito (nessuna condizione al contorno necessaria)
d) trascurati effetti di mitigazione del campo dovuto a schermatura di fatto (analisi conservativa)
e) sovrapposizione degli effetti
f) analisi in regime simbolico (calcolo dei moduli e delle fasi)

Il software è stato sviluppato da tecnici specializzati con la collaborazione e la supervisione di docenti e ricercatori del Politecnico di Torino – Dipartimento Energia (prof. Aldo Canova e Ing. Luca Giaccone).

2. Verifica del modulo bidimensionale

La verifica del modulo bidimesionale è stata condotta mediante confronto con la formulazione analitica, come indicato dalla CEI 211-04, e mediante confronto con un codice di calcolo sviluppato dal CESI.

2.1. Confronto con CEI 211-04

Una possibile validazione del programma utilizzato può essere effettuata confrontando il campo calcolato con il programma stesso e quello calcolato per via analitica, secondo le norma CEI 211-4 paragrafo 4.3, su di un caso in cui questa seconda procedura è applicabile in modo esatto. Tale caso si riferisce ad un sistema di conduttori rettilinei, paralleli e indefiniti.

Sotto queste ipotesi l'induzione magnetica B è data dall'espressione:

$$\bar{B} = \frac{\mu_0}{2\pi} \sum_{k=1}^{N} \frac{\bar{I}_k}{d_k} \bar{u}_I \times \bar{u}_r$$

in cui N è il numero dei conduttori, d è la distanza tra il conduttore k-esimo e il punto di calcolo; i versori $\bar{u}_I$ e $\bar{u}_r$ indicano, rispettivamente, il verso della corrente e della relativa normale; x indica il prodotto vettoriale.

In particolare è stato analizzato il caso, che verrà riportato successivamente, relativo ad una linea a doppia terna su semplice palificazione con corrente di 310 A. Come si può osservare dalla figura 1, le due curve sono praticamente coincidenti.

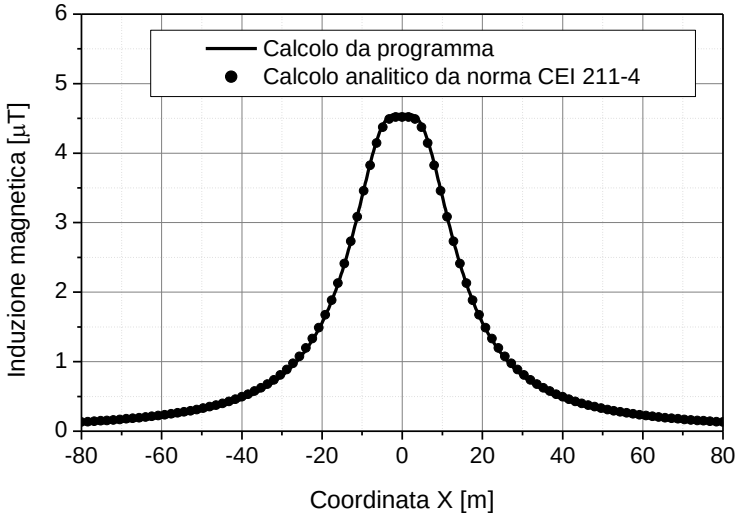


Figure 1 Induzione magnetica al suolo in prossimità di una linea aerea a doppia terna su semplice palificazione con corrente di 310: confronto tra MAGIC® e formula analitica CEI 211-4

Come si può osservare il profilo di induzione magnetica ottenuto dal software MAGIC® coincide esattamente con i punti calcolati mediante la formula analitica CEI 211-4.

2.2. Confronto con codice CESI

L'analisi del campo magnetico prodotto è stata condotta su due terne trifase di cavi affiancate. Le sezioni di affiancamento riguardano (Fig. 2):

- Buca giunti (interasse 70 cm e livello di interramento pari a 1.25 m)
- Formazione piana (interasse 35 cm e livello di interramento pari a 1.25 m)
- Distanza tra le due terne: 4m

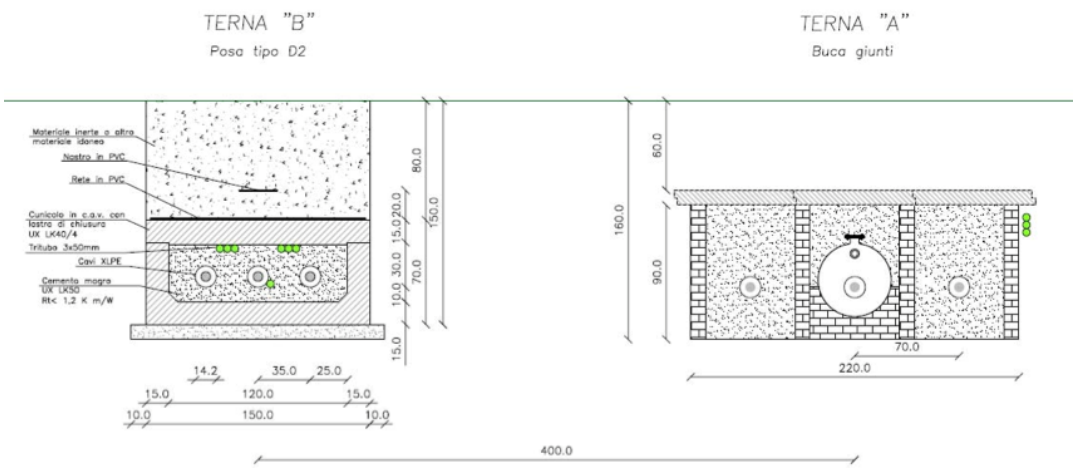


Figure 2 Affiancamento tra due linee interrate AT

Condizioni di carico e relazioni di fase:

- Terna B: Ieff = 1500 A (RST)
- Terna A: Ieff = 1500 A (TSR)

La configurazione analizzata mediante il codice sviluppato dal CESI porta alla distribuzione di campo riportata in Figura 3.

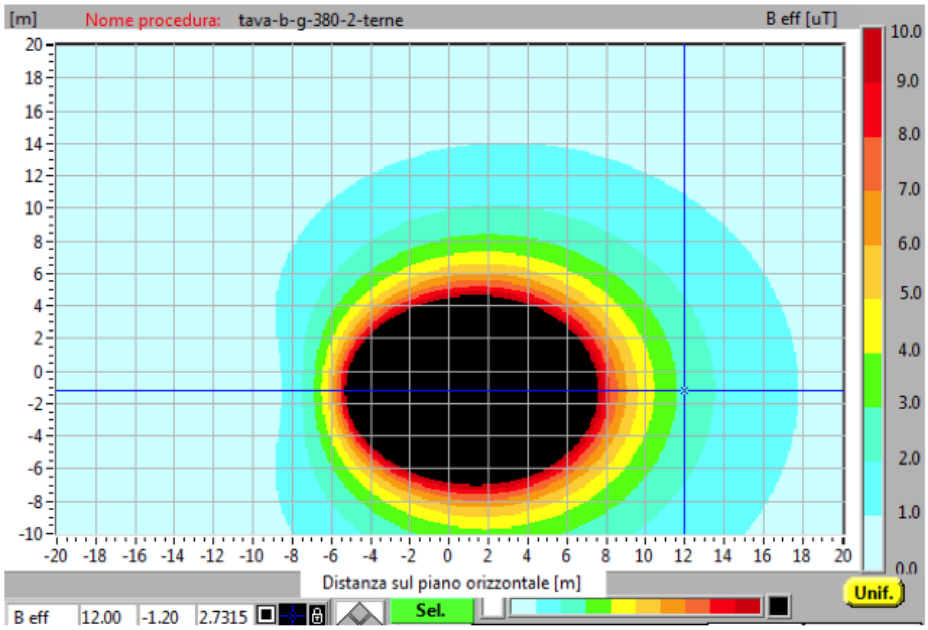


Figure 3 Mappa cromatica delle induzioni magnetiche calcolata mediante software CESI

La stessa configurazione è stata analizzata mediante il codice MAGIC® e può essere studiata attraverso due possibili funzioni messe a disposizione dal software:

- Terne parallele
- Multiconduttori 2D

In questo documento verrà utilizzato il Multiconduttore 2D (Fig. 4) che permette di definire un sistema di N conduttori posizionati arbitrariamente in cui viene applicata una corrente arbitraria.

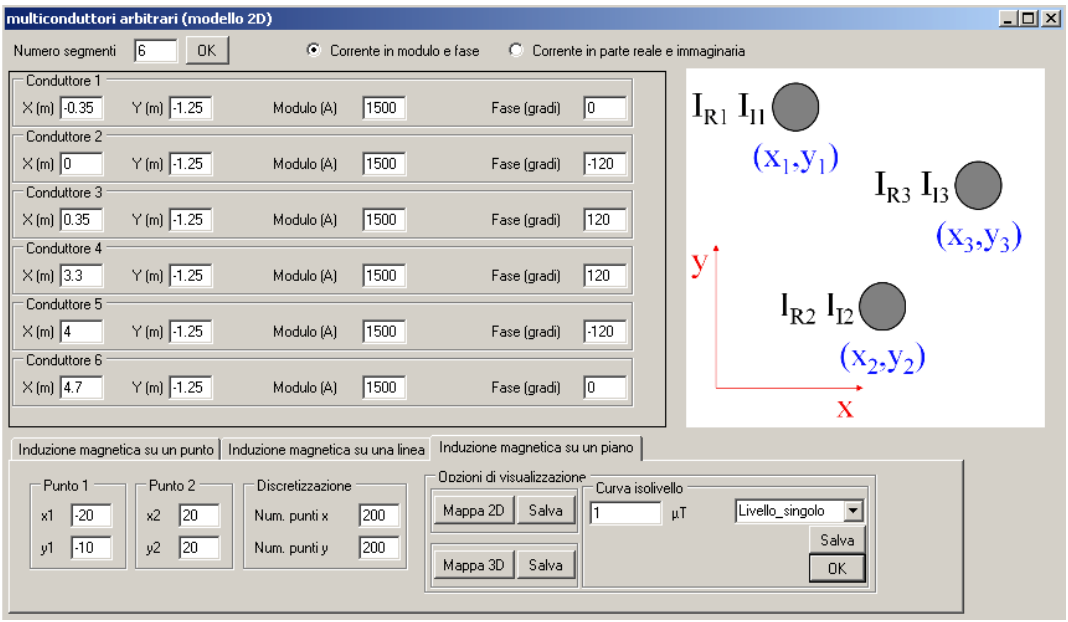


Figure 4 Schermata di ingresso modulo "multiconduttori arbitrari (modello 2D)": dati definizione geometria e sorgenti

Nella seguente Fig. 5 è riportata la "geometria" del sistema che può essere visualizzata al termine dell'inserimento dati.

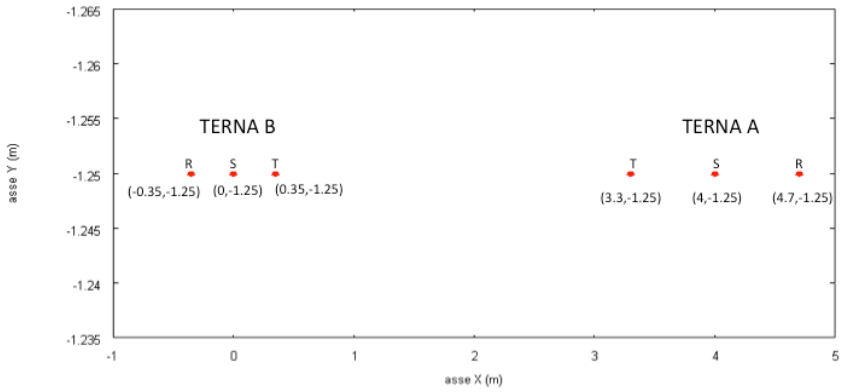


Figure 5 Geometria sorgenti

In Fig. 6 è riportata la mappa cromatica dell'induzione magnetica ottenuta dal software MAGIC® (valori in microT):

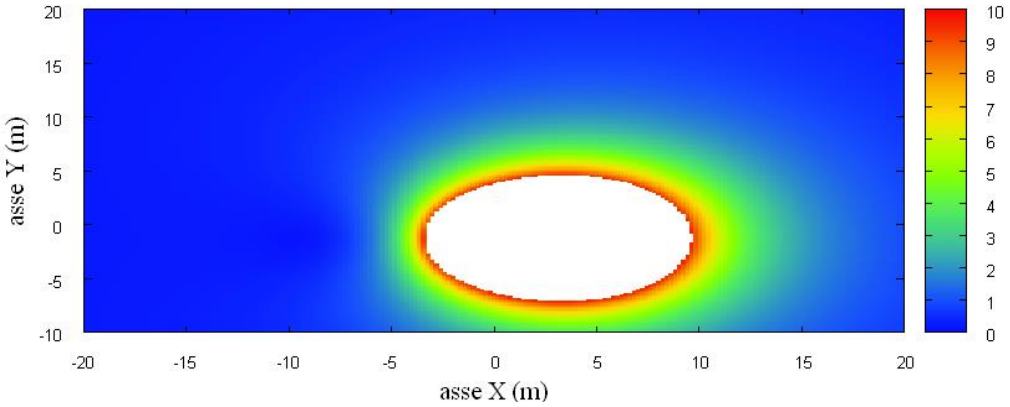


Figure 6 Mappa cromatica dell'induzione magnetica ottenuta dal software MAGIC® (valori in microT):

In Fig. 7 sono riportate le linee isolivello dell'induzione magnetica (1, 3, 10, 100 microT) visualizzabili dal software MAGIC®.

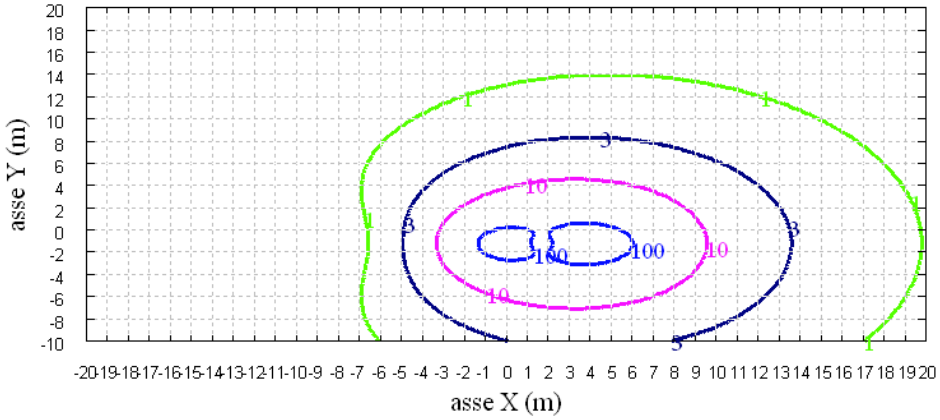


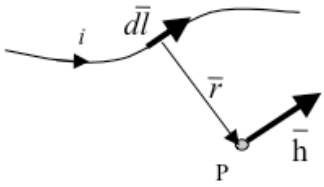
Figure 7 Linee isolivello dell'induzione magnetica (1, 3, 10, 100 microT) da software MAGIC®

Come si può osservare le mappe cromatiche dei due modelli risultano essere in perfetto accordo.

3. Verifica del modulo tridimensionale

Il modulo tridimensionale del MAGIC® si basa principalmente sull'integrazione della formula di Biot-Savart:

$$\vec{h} = \int \frac{i\vec{dl} \wedge \vec{r}}{4\pi r^2}$$



Nelle configurazioni impiantistiche si ha spesso a che fare con fasci di cavi che il cui profilo copre percorsi approssimabili con buona precisione a delle spezzate tridimensionali. Ogni spezzata è quindi modellabile mediante una successione di segmenti opportunamente orientati nello spazio. Ne consegue che, sapendo valutare il campo di un segmento arbitrariamente orientato nello spazio, è possibile calcolare il campo prodotto da un fascio di cavi mediante la sovrapposizione degli effetti di tutti i segmenti costituenti il fascio.

3.1. Campo prodotto da un segmento finito arbitrariamente orientato

Si consideri il segmento rappresentato nella Fig. 8.

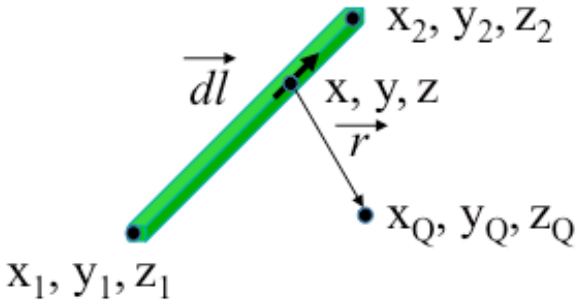


Figure 8 Modello del segmento.

L'equazione del segmento in forma parametrica diventa la seguente:

$$\begin{cases} x = x_1 + (x_2 - x_1)t \\ y = y_1 + (y_2 - y_1)t \\ z = z_1 + (z_2 - z_1)t \end{cases}$$

Si consideri inoltre che:

$$\vec{r} = (x_Q + x)\vec{a}_x + (y_Q + y)\vec{a}_y + (z_Q + z)\vec{a}_z$$

$$\vec{dl} = dx\vec{a}_x + dy\vec{a}_y + dz\vec{a}_z$$

Facendo le opportune sostituzioni, la formula di Biot-Savart può essere risolta conducendo ad una formula chiusa per il calcolo delle tre componenti di campo H_x, H_y e H_z (ovvero B_x, B_y e B_z). L'integrazione, sebbene sia macchinosa e porti ad espressioni analitiche poco compatte, può essere semplicemente risolta mediante l'utilizzo di un processore simbolico. Per tutti i dettagli circa l'integrazione si consideri la seguente referenza:

Canova A.; F. Freschi; M. Repetto; M. Tartaglia, (2005), Description of Power Lines by Equivalent Source System. In: COMPEL, vol. 24, pp. 893-905. - ISSN 0332-1649

3.2. *Validazione sperimentale del modulo tridimensionale*

In Fig. 9 viene rappresentata una spira costituita da 4 conduttori rettilinei che ben rappresenta una sorgente di tipo tridimensionale.

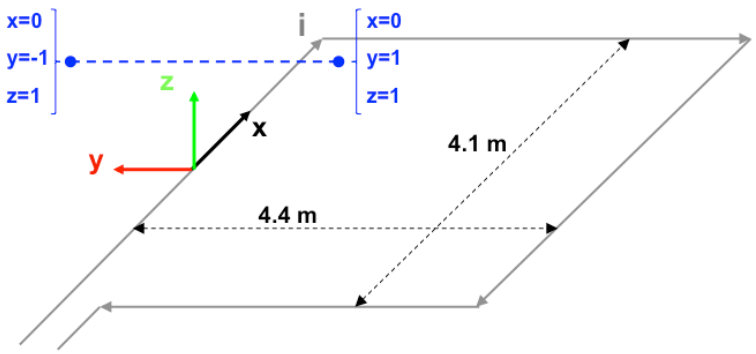


Figure 9 Schema di spira quadrata.

Nella stessa immagine viene rappresentata una linea di confronto con le seguenti caratteristiche:

- È posta a 1 m da terra ➔ z = costante = 1m
- Si estenda lungo l'asse y ➔ x = costante = 0 m
- E' lunga due metri: ➔ y minimo = -1 m, y massimo = 1 m

Su tale linea di confronto sono state eseguite delle misure sperimentali mediante sistema composto da sonda PMM-EHP50 C le cui caratteristiche sono riportate nel seguente elenco:

- Range di frequenze 5Hz – 100 kHz
- Range di campo elettrico 0.01 V/m – 100 kV/m
- Range di campo magnetico 1 nT – 10 mT
- Risoluzione 0.01 V/m - 1 nT
- Tempo di campionamento 30, 60 sec
- Massima acquisizione 1600 ore con acquisizione ogni 60 sec.
- SPAN 100, 200,500 Hz, 1 kHz, 2 kHz, 10 kHz, 100 kHz

Viene infine eseguito il confronto tra misure sperimentali e calcolo eseguito mediante software MAGIC®. I risultati di confronto sono riassunti nella seguente figura.

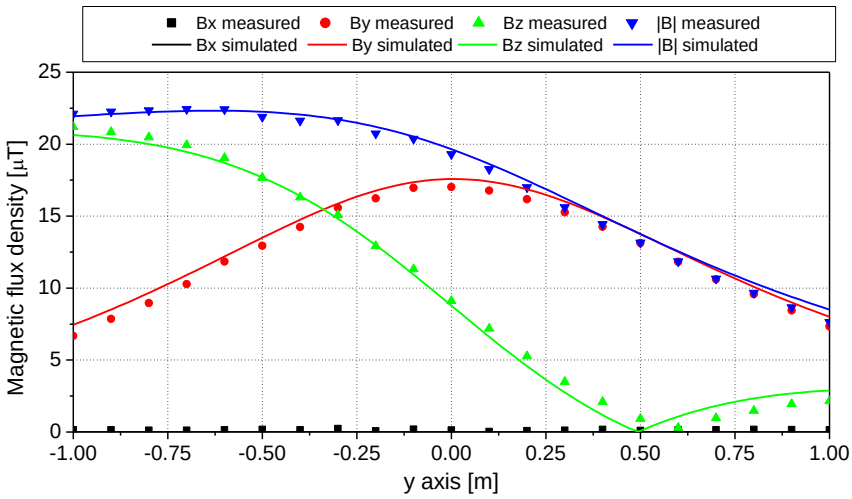


Figure 10 Induzione magnetica misurata e calcolata mediante software MAGIC®.

Si dimostra quindi che le misure sperimentali sono in perfetto accordo con il modello implementato nel software MAGIC®.

4. Verifica del modulo tridimensionale:trasformatore di potenza

In questa sezione vengono riportati i principali risultati ottenuti utilizzando il software MAGIC® nella simulazione dei campi generati da un trasformatore in resina (il trasformatore in olio rappresenta una situazione semplificata rispetto a quello in resina).

La validazione è condotta in due step:

- Verifica del modello MAGIC della singola colonna del trasformatore con modello FEM (Finite Element Method)
- Verifica del modello MAGIC del trasformatore completo con misure sperimentali

Maggiore dettaglio sui confronti sono riportati nella seguente referenza:

A. Canova, L. Giaccone, M. Manca, R. Turri, P. Casagrande, "Simplified power transformer models for environmental magnetic impact analysis", 2° Int. Conf. on EMF-ELF, Paris, 24-25 Marzo 2011.

4.1. Verifica del modello MAGIC® della singola colonna del trasformatore con modello FEM (Finite Element Method)

MAGIC® propone due diversi modelli per il trasformatore: il primo di tipo semplificato e valido a partire da circa 0.5-1m dal trasformatore, il secondo più rigoroso valido anche a piccole distanze dal trasformatore. Nel seguito i due modelli verranno indicati come Modello 1 e Modello 2.

Un primo confronto tra i due modelli è stato effettuato con un codice agli elementi finiti (FEMM) di tipo assialsimmetrico. In Figura 11 sono riportate le principali dimensioni del caso analizzato: avvolgimento primario e secondario di un trasformatore di 630 kVA in resina e l'indicazione delle linee di calcolo.

Nei calcoli che seguono i due avvolgimenti sono caratterizzati dalle stesse amperspire in opposizione (N1*I1=N2*I2) e verranno considerate, come sorgenti, le correnti nominali.

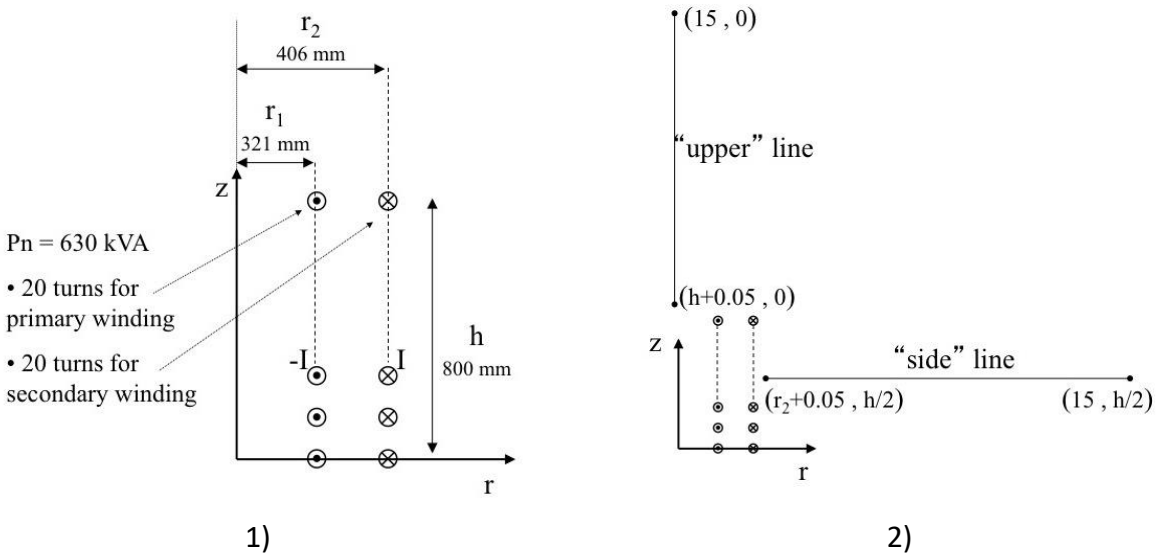


Figure 11 Geometria del sistema (1) e linee di calcolo (2)

Le Fig. 12 e 13 mostrano, rispettivamente, i valori di induzione magnetica lungo la linea ad 1m dal lato degli avvolgimenti e lungo la linea ad 1.5 m sopra gli avvolgimenti. Le figure mettono a confronto il "modello 1 e 2" ed il calcolo, assunto come riferimento, effettuato mediante codice FEM.

Si può osservare un ottimo accordo tra i "modelli 1 e 2" adottati nel MAGIC® lungo entrambe le linee mentre per distanze inferiori al metro il modello semplificato, con particolare riferimento al campo lungo la linea verticale, risulta portare a delle discrepanze significative. Per tali distanze è pertanto conveniente utilizzare il "modello 2" che risulta più accurato a spese di un maggiore peso computazionale (nell'ordine comunque delle decine di secondi).

I modelli inseriti nel MAGIC® sono inoltre confrontati con il modello proposto da un altro software commerciale (EFC-400) che verrà denominato "Modello 3". Tale modello è basato sull'ipotesi che il campo magnetico disperso, essendo correlato con la reattanza di dispersione del trasformatore, risulta quantitativamente correlato alla tensione di corto circuito. Il modello proposto da EFC-400 è quindi costituito da un unico avvolgimento (che sintetizza il primario ed il secondario) percorso da una corrente ridotta, rispetto alla corrente nominale, secondo la seguente formula:

$$I = I_R \cdot \frac{V_{SC}\%}{100}$$

in cui I_R è la corrente nominale (di primario o secondario) e V_{SC} è la tensione di cortocircuito percentuale. Può essere utilizzata la corrente di primario o di secondario (I_{R1} *o* I_{R2}) e corrispondentemente occorre considerare le spire di primario o secondario (N_1 *e* N_2).

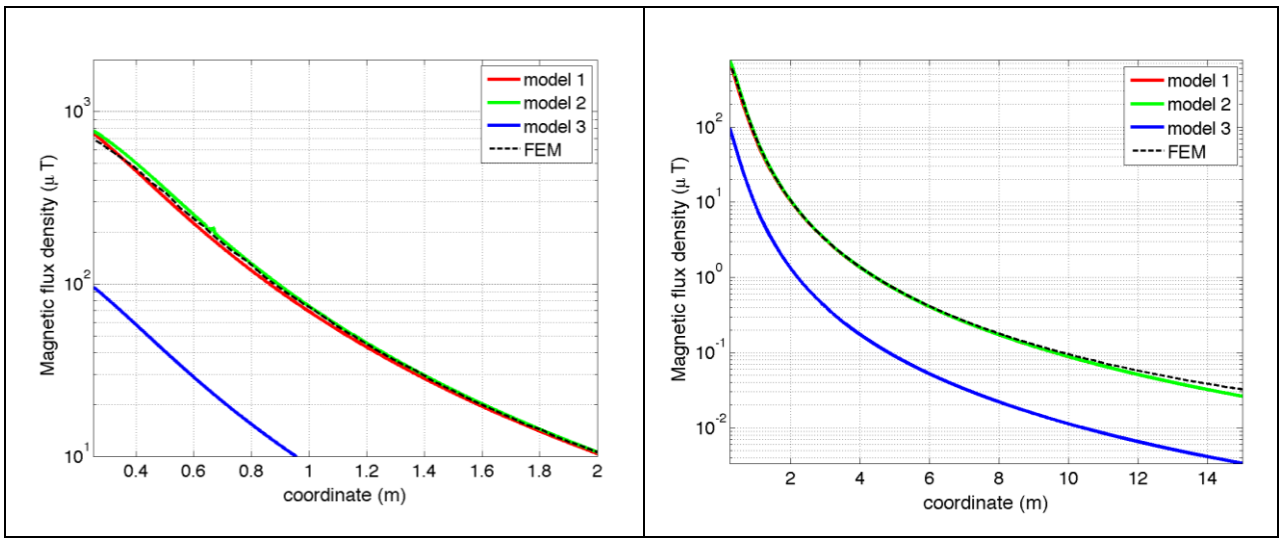


Figure 12 Induzione magnetica lungo la linea laterale

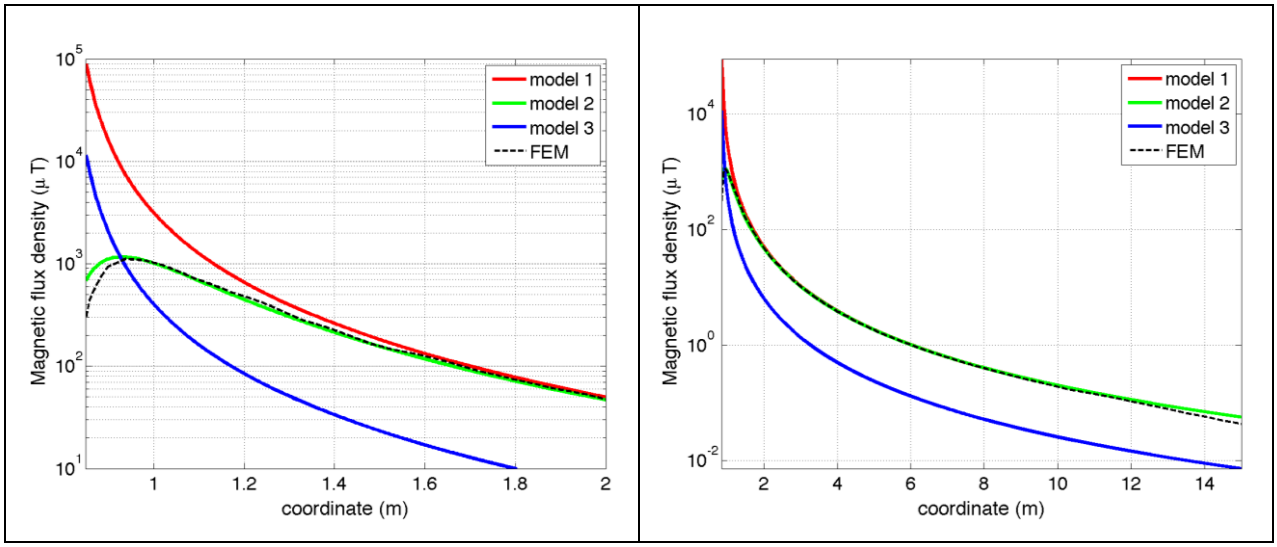


Figure 13 Induzione magnetica lungo la linea superiore

Come si può osservare dai profili di induzione magnetica il modello 3 risulta scarsamente idoneo a modellare i due avvolgimenti concentrici di primario e secondario.

4.2. Verifica del modello MAGIC® del trasformatore completo con misure sperimentali

In questo paragrafo il modelli vengono confrontati con dati sperimentali. Il caso analizzato si riferisce ad un trasformatore in resina da 630 kVA, 15kV/400V, funzionante in condizioni di corto circuito (Fig. 14). Il trasformatore viene alimentato con una tensione che fa circolare negli avvolgimenti una corrente pari al 42% della corrente nominale, si ha quindi 10.4 A di primario (lato MT) e 390 A di secondario (lato BT). Il modello del trasformatore risulta quindi completo e costituito da tutti gli avvolgimenti delle tre fasi.

Le linee di calcolo S1 ed S2 (Fig. 15) sono poste ad 1.5m dal piano di appoggio del trasformatore. E' importante sottolineare che il contributo dei terminali di BT influisce significativamente sul campo magnetico ambientale, specialmente nella direzione S1. Pertanto, l'introduzione di tali sorgenti addizionali agli avvolgimenti porta ad una riduzione degli scostamenti tra i vari modelli.

In Fig. 16 e 17 sono riportati i confronti tra le induzioni magnetiche, lungo le linee S1 ed S2, misurate e calcolate con i diversi modelli.

Come si può osservare, in particolare per la linea S2 (dove il contributo delle connessioni è trascurabile) il modello 1 ed il modello 2 approssimano in modo soddisfacente i dati sperimentali.

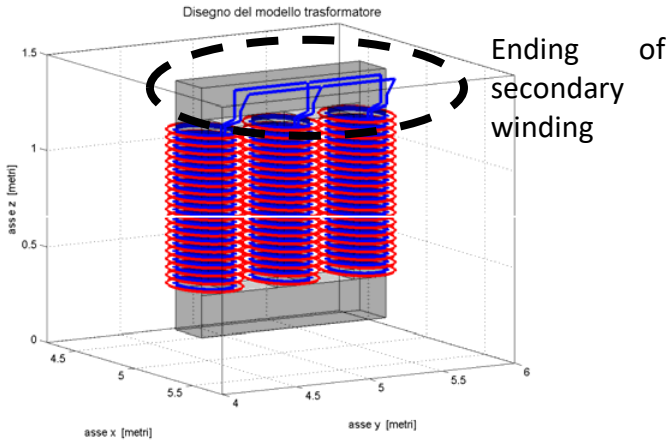


Figure 14 Connessioni elettriche considerate ai lati BT.

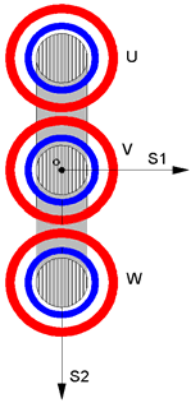


Figure 15 Linee di calcolo S1 ed S2

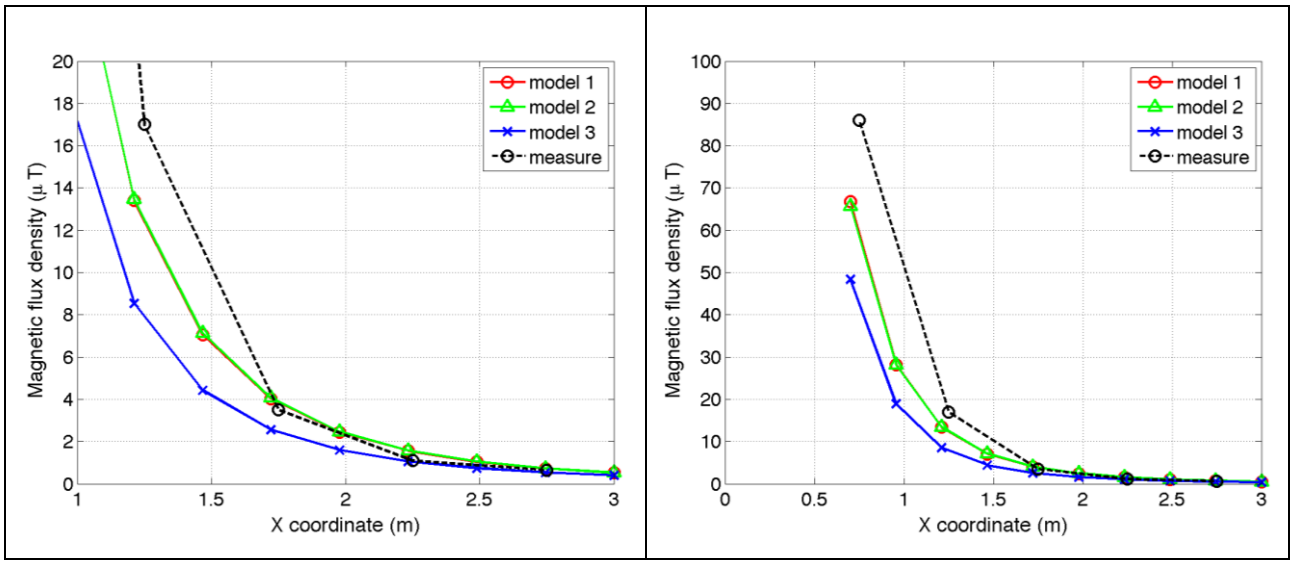


Figure 16 Confronto tra misure modelli lungo la linea S1

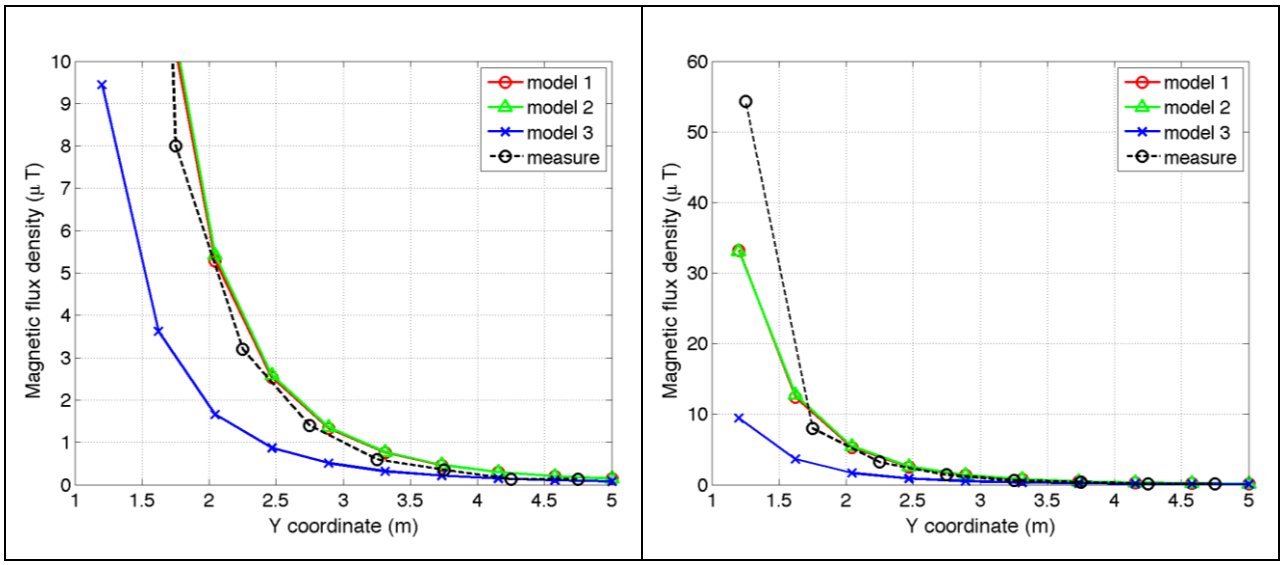


Figure 17 Confronto tra misure modelli lungo la linea S2

5. Conclusioni

Il presente documento si propone di fornire alle autorità competenti tutti gli elementi necessari affinché il software MAGIC® possa essere validato secondo quanto richiesto dal Decreto Ministeriale (160) del 29/05/2008 "Approvazione della metodologia di calcolo per la determinazione delle fasce di rispetto per gli elettrodotti".

Come indicato nell'art. 5.1.2 (Calcolo delle fasce di rispetto per linee elettriche) del decreto del 29/05/2008, i modelli tridimensionali non sono ancora standardizzati, tuttavia un software in cui i modelli soddisfino ai seguenti requisiti indicati nel decreto:

"…i modelli utilizzati devono essere descritti in termini di algoritmi implementati, condizioni al contorno e approssimazioni attuate. Essi devono essere validati attraverso misure o per confronto con modelli che abbiano subito analogo processo di verifica. La documentazione esplicativa e comprovante i criteri di cui sopra deve essere resa disponibile alle autorità competenti ai fini dei controlli"

può essere ritenuto idoneo allo scopo e, a tal fine, è stato redatto il presente documento.

Per quanto concerne in particolare le cabine elettriche, la complessità delle sorgenti in esame richiede una valutazione accurata che tenga conto principalmente della tridimensionalità delle singole sorgenti e l'effetto prodotto dalla combinazione delle stesse (sovrapposizione degli effetti). Nelle analisi precedentemente svolte sono stati analizzati e validati i principali componenti costituenti le cabine quali linee elettriche di connessione (tratti di conduttori di lunghezza finita), quadri elettrici (tratti conduttori di lunghezza finita) e trasformatori (elementi toroidali e tratti di conduttore di lunghezza finita).

Dai risultati ottenuti e presentati è quindi possibile concludere che il Software MAGIC® ha le caratteristiche per essere rispondente alle indicazioni richieste dal Decreto Ministeriale (160) del 29/05/2008, lasciando ovviamente alle autorità competenti la verifica ed il giudizio finale.

Calcolo del campo elettrico generato da sistemi di conduttori rettilinei indefiniti

Finalità

Questo strumento permette di determinare i livelli di **campo elettrico** dispersi da uno o più fasci (o **sistemi**) di conduttori **rettilinei indefiniti**, tutti paralleli tra di loro. Un modello di questo tipo viene comunemente utilizzato per rappresentare gli elettrodotti, come previsto anche dalla guida CEI 211-4 «Guida ai metodi di calcolo dei campi elettrici e magnetici generati da linee e da stazioni elettriche», almeno per la parte relativa ai modelli bidimensionali.

Lo strumento è utile pertanto per valutare **l'esposizione al campo elettrico di quanti, per lavoro o altro, devono permanere nei pressi di elettrodotti**, nei casi in cui un modello bidimensionale consente di ottenere un risultato accurato. Questo avviene, in particolare, in presenza di linee aeree, intorno alle quali i conduttori possano essere considerati paralleli tra di loro e rispetto alla superficie del terreno, perlomeno per un tratto sufficientemente lungo rispetto alle distanze tra i conduttori stessi.

Impostazione generale

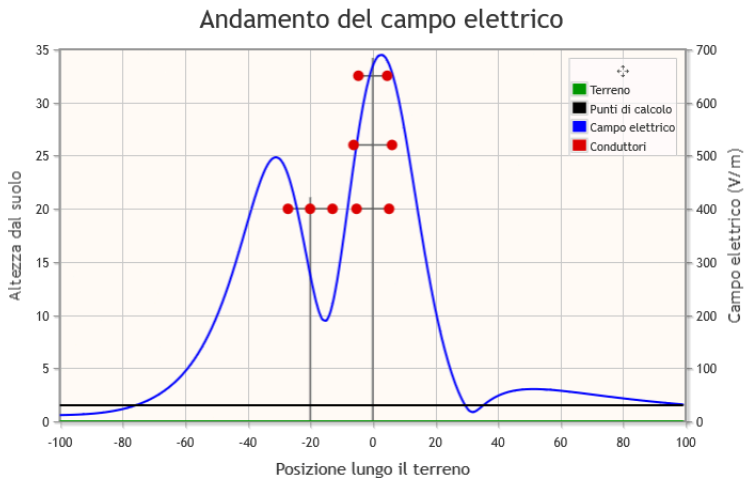
L'applicazione permette di considerare fino a 10 **fasci di conduttori**, ognuno dei quali rappresenta, nel caso più tipico, un **elettrodotto**

trifase; tuttavia, l'approccio generale adottato rende l'applicazione molto flessibile, in grado di adattarsi a situazioni anche assai diverse.

Ogni sistema di conduttori viene descritto attraverso i dati di partenza inseriti in una specifica sottoscheda numerata, collocata nella scheda *Inserimento dati*. Questi dati sono costituiti dalla posizione dei conduttori nello spazio (specificata attraverso la localizzazione del punto di intersezione del conduttore con il piano di calcolo) e dai valori dell'intensità e della fase della corrente su di essi.

L'elaborazione produce, nella scheda *Risultati*, un riepilogo con il valore di picco e la distanza dall'origine del punto in cui questo viene raggiunto, e una tabella contenente le distanze dall'origine a cui si ottengono una serie di valori significativi (1, 2 e 5 V/m).

Viene inoltre visualizzato un grafico, che mostra l'andamento dell'intensità del campo elettrico lungo un segmento posizionato sul piano di calcolo e parallelo al suolo (v. figura seguente, click per ingrandire).



Dettagli relativi al calcolo

Geometria dei conduttori

I conduttori sono considerati di forma cilindrica, con diametro costante e piccolo rispetto alle mutue distanze. A differenza della procedura di calcolo utilizzata nella norma 211-4, in cui ad un certo punto si considerano i conduttori unidimensionali, nella presente si considera il raggio degli stessi in tutti i passaggi.

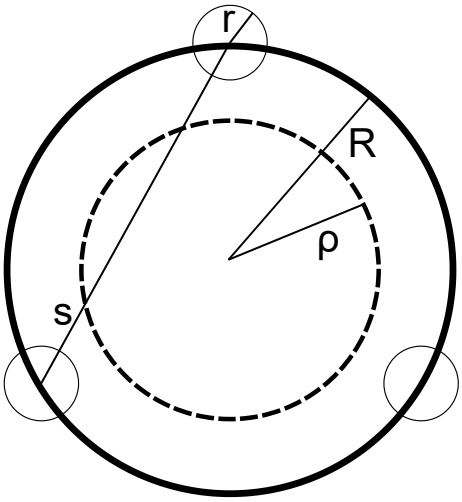
Conduttori a fascio

In questo caso si suppone che:

- la distanza tra subconduttori di una fase sia piccola rispetto alla distanza tra i conduttori a diverso potenziale;

- tutti i subconduttori di una fase siano uguali tra di loro;
- in una sezione normale del fascio i centri dei subconduttori di una fase giacciano su una circonferenza.

In caso di n conduttori di raggio r, disposti attorno ad una circonferenza di raggio R, essendo s la distanza tra subconduttori adiacenti, per il calcolo si utilizza il raggio equivalente ρ:

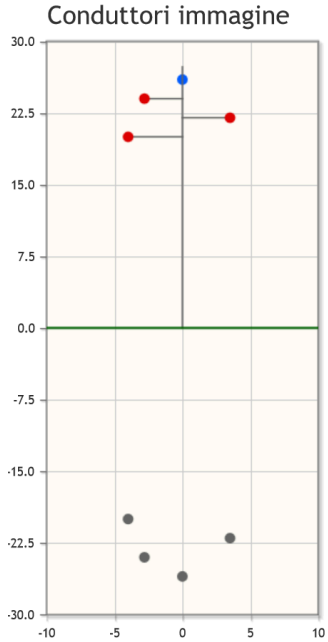


$$\rho = \sqrt[n]{n \cdot r \cdot R^{n-1}} = \sqrt[n]{n \cdot r \cdot \left(\frac{s}{2 \cdot \sin \frac{\pi}{n}} \right)^{n-1}}$$

Approssimazioni

Viene trascurata la presenza dei tralicci o piloni di sostegno, degli edifici, della vegetazione e di qualunque altro oggetto nell'area interessata.

Il terreno, piano e privo di irregolarità, viene considerato come perfettamente conduttore, e se ne tiene conto utilizzando la teoria delle cariche immagine.



Impostazione del calcolo

Oltre ai conduttori di fase, si considerano anche le funi di guardia (in azzurro nella figura), poste al potenziale di terra.

Dati N_C conduttori, indicate con:

- V_1, V_2, ... V_{2N_C} le rispettive tensioni (comprese le immagini)
- λ_1, λ_2, ... λ_{2N_C} le densità di carica;
- P_1, P_2, ... P_{2N_C} le posizioni dei conduttori;

il campo elettrico in un punto Q è dato da:

$$\vec{E}(Q) = \frac{1}{2\pi\varepsilon_0}\sum_{k=1}^{2N_C}\lambda_k\frac{(Q-P_k)}{|Q-P_k|^2}$$

Si può esprimere la tensione del conduttore l-esimo rispetto a terra come:

$$V_l = -\frac{1}{2\pi\varepsilon_0}\sum_{k=1}^{2N_C}\lambda_k\ln\frac{d_{kl}}{h_k} = \frac{1}{2\pi\varepsilon_0}\sum_{k=1}^{N_C}\lambda_k\ln\frac{d_{kl}}{d_{(k+N_C)l}}$$

ove:

- h_k è l'altezza da terra del k-esimo conduttore;
- d_{kl} la distanza dal centro del conduttore k-esimo alla superficie del conduttore l-esimo;
- d_{kk} il raggio del conduttore l-esimo.

Per determinare le densità di carica è necessario risolvere un sistema lineare di N_C equazioni in N_C incognite (le densità λ_k) di questo tipo.

In forma matriciale, tale sistema può essere espresso, indicando con [V(t)] e [λ(t)] i vettori delle tensioni e delle densità di carica, come:

$$[V(t)] = [P][\lambda(t)]$$

e le densità lineari di carica si ottiene invertendo la matrice dei parametri:

$$[\lambda(t)] = [P]^{-1}[V(t)] = [C][V(t)]$$

avendo posto:

$$[C] = [P]^{-1}[V(t)]$$

In particolare, la componente i-esima di [λ(t)] si ottiene, indicando con c_{ik} l'elemento di [C], da:

$$\lambda_i(t) = \sum_{k=1}^{N_C}c_{ik}V_k(t) = \sum_{k=1}^{N_C}c_{ik}V_k\cos\left(\omega t+\varphi_k\right) = \lambda_i\cos\left(\omega t+\vartheta_i\right)$$

ove V_k e φ_k indicano rispettivamente la tensione le la fase del k-esimo conduttore, e l'ultima uguaglianza è possibile in virtù del fatto che la frequenza del segnale è la stessa per tutti i conduttori.

Utilizzando i fasori:

$$\lambda_i(t) \Rightarrow^F \Lambda_i \equiv \sum_k c_{ik} V_k e^{j\varphi_k}$$

Si ottiene:

$$\lambda_i = \sqrt{\left(\sum_k c_{ik} V_k \cos\varphi_k\right)^2 + \left(\sum_k c_{ik} V_k \sin\varphi_k\right)^2}$$

$$\vartheta_i = \begin{cases} \frac{\pi}{2} & \text{se } R(\Lambda_i) = 0 \text{ e } I(\Lambda_i) > 0 \\ -\frac{\pi}{2} & \text{se } R(\Lambda_i) = 0 \text{ e } I(\Lambda_i) < 0 \\ \operatorname{arctg}\left(\frac{\sum_k c_{ik} V_k \sin\varphi_k}{\sum_k c_{ik} V_k \cos\varphi_k}\right)^2 & \text{altrimenti} \end{cases}$$

Una volta ricavate le densità di carica, si utilizzano nella formula iniziale per determinare il campo elettrico efficace. Ricordando che la componente parallela al conduttore è nulla:

$$E_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T E^2(t)\,dt} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T E_x^2(t) + E_y^2(t)\,dt}$$

Limitazioni

La condizione di base del modello, cioè la validità di una **rappresentazione bidimensionale** del problema, non può ritenersi soddisfatta in stretta prossimità di sostegni o di incroci tra due o più linee e, in generale, nelle stazioni elettriche.

Daniele Andreuccetti, Moreno Comelli & Nicola Zoppetti, CNR-IFAC, 2017-2026

[Iscrizione alla mailing list WebNIR]

CC BY NC SA